

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RAFAEL VITOR GUERRA QUEIROZ

**MODELO TRIDIMENSIONAL DE UM VEÍCULO DE TRÊS EIXOS BASEADO
NA VBTP-MR GUARANI POR TRANSFORMADORES CINEMÁTICOS**

**RIO DE JANEIRO
2020**

RAFAEL VITOR GUERRA QUEIROZ

**MODELO TRIDIMENSIONAL DE UM VEÍCULO DE TRÊS EIXOS
BASEADO NA VBTP-MR GUARANI POR TRANSFORMADORES
CINEMÁTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Ricardo Teixeira da Costa Neto - D.Sc.

Rio de Janeiro

2020

©2020

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, microfilmар 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).

Queiroz, Rafael Vitor Guerra

Modelo tridimensional de um veículo de três eixos baseado na VBTP-MR Guarani por transformadores cinemáticos / Rafael Vitor Guerra Queiroz. – Rio de Janeiro, 2020.

261 f.

Orientador: Ricardo Teixeira da Costa Neto.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Engenharia Mecânica, 2020.

1. modelagem da dinâmica veicular. 2. transformadores cinemáticos. 3. VBTP-MR Guarani. 4. MATLAB. I. Costa Neto, Ricardo Teixeira da, orient. II. Título


RAFAEL VITOR GUERRA QUEIROZ

**Modelo tridimensional de um veículo de três eixos
baseado na VBTP-MR Guarani por transformadores
cinemáticos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Ricardo Teixeira da Costa Neto

Aprovado em Rio de Janeiro, 11 de maio de 2020, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Ricardo Teixeira da Costa Neto - D.Sc. do IME - Presidente



Prof. Gustavo Simão Rodrigues - D.Sc do IME



Prof. Mauro Speranza Neto - D.Sc da PUC-RJ

Rio de Janeiro

2020

Aos meus filhos Antônio e João Marcos. Que seja um exemplo de que tudo na vida se ganha com muita disciplina e sacrifício. Vocês podem tudo, meus filhos. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha esposa Flavia. Dizem que “atrás de um homem bem-sucedido há uma grande mulher”. Discordo, pois você nunca esteve atrás de mim, esteve sempre ao meu lado, me apoiando, aconselhando e dando forças. Os frutos deste trabalho também são seus.

Aos meus pais Helcio e Sofia, pelo amor, pelo exemplo, e por desde cedo se abdicarem para investir nos meus estudos e de meu irmão.

Aos meus sogros Paulo e Carla, pela atenção, carinho e apoio, que nesta fase foram imprescindíveis para a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador TC Ricardo, pela disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Maj Marcelo Andrés Acuña, pela amizade, companhia nos trabalhos e pelas horas de estudo juntos.

A você, leitor, que em busca de conhecimento consulta esta dissertação. “Sua raridade não está naquilo que possui ou que sabe fazer, isso é um mistério de Deus com você: você é um espelho que reflete a imagem do Senhor.”

“O esforço é o único fator do qual temos pleno controle.”
(Edson Urubatan)

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo tridimensional de um veículo de três eixos com suspensões independentes MacPherson e esterçamento nos eixos dianteiro e intermediário, modeladas como transformadores cinemáticos. O método dos transformadores cinemáticos foi empregado a fim de se trabalhar com um número mínimo de coordenadas e considerar as não-linearidades provenientes da configuração de suspensão. Os parâmetros do veículo foram tomados da Viatura Blindada de Transporte de Pessoal (VBTP) 6x6 Guarani, do Exército Brasileiro. O modelo utiliza três formulações diferentes no cálculo das forças de suspensão, tomados de trabalhos anteriores sobre a VBTP Guarani, e três pneus com valores distintos de *cornering stiffness*, utilizados em veículos pesados ou de emprego militar. São desenvolvidas simulações de acomodação da suspensão quando o veículo é submetido ao próprio peso, trajetória circular em regime permanente e manobra evasiva dupla a baixas velocidades, e os resultados obtidos são comparados. Além disso, os resultados obtidos da simulação de manobra dupla evasiva são comparados com dados obtidos de um teste de campo nas mesmas condições. O modelo foi desenvolvido no software MATLAB.

Palavras-chave: modelagem da dinâmica veicular. transformadores cinemáticos. VBTP-MR Guarani. MATLAB.

ABSTRACT

This work presents a three-dimensional model of a three-axle vehicle with MacPherson independent suspensions and front and intermediate steering, such mechanisms modelled as kinematic transformers. The kinematic transformers method was used in order to work with the minimum number of coordinates and consider the suspension configuration intrinsic nonlinearities. The vehicle model is based on the Guarani 6x6 Wheeled Armored Personnel Carrier, in service in the Brazilian Army. The model uses three different formulations of the suspension forces, obtained from previous works about VBTP Guarani, and three tires with different values of *cornering stiffness*, used on heavy or military vehicles. It is developed simulations of suspension accommodation when the vehicle is submitted to own weight, steady-state cornering and double evasive maneuver (so called moose test) in low velocities, and the results are compared. Furthermore, the results of double evasive manoeuver are compared with data obtained from a field test with the same conditions. The model was developed in MATLAB software.

Keywords: vehicle dynamics modelling. kinematic transformers. VBTP-MR Guarani. MATLAB.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de cadeia cinemática em série (1)	22
Figura 2 – Exemplo de cadeia cinemática em árvore (1)	22
Figura 3 – Exemplo de cadeia cinemática fechada (1)	22
Figura 4 – Solução de um mecanismo de cadeia fechada (1)	23
Figura 5 – Suspensão dianteira direita tipo MacPherson (1)	25
Figura 6 – Coordenadas e corpos envolvidos no 1° TC (1)	27
Figura 7 – Coordenadas e corpos envolvidos no 2° TC (1)	28
Figura 8 – Diagrama de blocos – método dos transformadores cinemáticos	38
Figura 9 – Localização dos centros de massa (1)	39
Figura 10 – Ângulo α de desvio do pneu (2)	40
Figura 11 – Interpretação gráfica do <i>cornering stiffness</i> (3)	40
Figura 12 – <i>cornering stiffness</i> em função da carga (3)	41
Figura 13 – Força lateral em função da força vertical (3)	41
Figura 14 – <i>cornering stiffness</i> em função da pressão (3)	41
Figura 15 – <i>cornering coefficient</i> em função da porcentagem de carga (3)	42
Figura 16 – Esterçamento de um veículo de três eixos (2)	43
Figura 17 – Relação entre δ_i e δ_o de um mesmo eixo (2)	44
Figura 18 – Vista em perspectiva da VBTP-MR Guarani (4)	44
Figura 19 – Suspensão MacPherson dianteira direita da VBTP-MR Guarani	44
Figura 20 – Suspensão da VBTP-MR Guarani, medidas em mm (5)	45
Figura 21 – Suspensão da VBTP-MR Guarani, medidas em mm (5)	45
Figura 22 – Suspensão da VBTP-MR Guarani, medidas em mm (5)	45
Figura 23 – Vista superior de uma manobra evasiva dupla (6)	46
Figura 24 – Esquema de montagem dos equipamentos de medição	46
Figura 25 – Mecanismo de direção das rodas diante. e o mecanismo de Ackerman.	50
Figura 26 – Mecanismo de direção das rodas interm. e o mecanismo de Ackerman.	50
Figura 27 – Mec. de direção das rodas ext. à curva e o mecanismo de Ackerman.	51
Figura 28 – Mec. de direção das rodas int. à curva e o mecanismo de Ackerman.	51
Figura 29 – Âng de esterçamento das rodas em função do âng. do volante.	52
Figura 30 – Força de suspensão das rodas do eixo dianteiro (3° caso).	54
Figura 31 – Força de suspensão das rodas do eixo intermediário (3° caso).	54
Figura 32 – Força de suspensão das rodas do eixo traseiro (3° caso).	55
Figura 33 – Força de suspensão das rodas do eixo dianteiro (4° caso).	56
Figura 34 – Força de suspensão das rodas do eixo intermediário (4° caso).	56
Figura 35 – Força de suspensão das rodas do eixo traseiro (4° caso).	56
Figura 36 – Altura do CG em relação ao solo – sim. 1, suspensão 1	58

Figura 37 – Ângulo do braço inferior com o chassi – sim. 1, suspensão 1	59
Figura 38 – Força vertical em cada roda – sim. 1, suspensão 1	60
Figura 39 – Ângulo de câmber das rodas – sim. 1, suspensão 1	61
Figura 40 – Ângulo de convergência dos eixos – sim. 1, suspensão 1	61
Figura 41 – Efeito de <i>bump steer</i> na roda dianteira direita	62
Figura 42 – Deslocamento vertical em função do âng. de câmber da roda DD	63
Figura 43 – Ângulo de <i>pitch</i> do veículo – sim. 1, suspensão 1	63
Figura 44 – Ângulo de <i>roll</i> do veículo – sim. 1, suspensão 1	64
Figura 45 – Ângulo de orientação do veículo – sim. 1, suspensão 1	64
Figura 46 – Altura do CG em relação ao solo – sim. 1, suspensão 2	65
Figura 47 – Ângulo do braço inferior com o chassi – sim. 1, suspensão 2	66
Figura 48 – Força vertical em cada roda – sim. 1, suspensão 2	66
Figura 49 – Ângulo de câmber das rodas – sim. 1, suspensão 2	67
Figura 50 – Ângulo de convergência dos eixos – sim. 1, suspensão 2	67
Figura 51 – Ângulo de <i>pitch</i> do veículo – sim. 1, suspensão 2	68
Figura 52 – Ângulo de <i>roll</i> do veículo – sim. 1, suspensão 2	68
Figura 53 – Ângulo de orientação do veículo – sim. 1, suspensão 2	68
Figura 54 – Altura do CG em relação ao solo – sim. 1, suspensão 3	69
Figura 55 – Ângulo do braço inferior com o chassi – sim. 1, suspensão 3	70
Figura 56 – Força vertical em cada roda – sim. 1, suspensão 3	70
Figura 57 – Ângulo de câmber das rodas – sim. 1, suspensão 3	71
Figura 58 – Ângulo de convergência dos eixos – sim. 1, suspensão 3	71
Figura 59 – Ângulo de <i>pitch</i> do veículo – sim. 1, suspensão 3	72
Figura 60 – Ângulo de <i>roll</i> do veículo – sim. 1, suspensão 3	72
Figura 61 – Ângulo de orientação do veículo – sim. 1, suspensão 3	72
Figura 62 – Esterçamento do volante na sim 2 para as suspensões 1 e 2	74
Figura 63 – Esterçamento do volante na sim 2 para a suspensão 3	74
Figura 64 – Posição do CG do veículo durante a manobra- susp 1	75
Figura 65 – Forças laterais produzidas pelos pneus do lado direito – pneus 1 e 2	76
Figura 66 – Forças laterais produzidas pelos pneus do lado direito – pneu 3	76
Figura 67 – Forças laterais produzidas pelos pneus do lado esquerdo – pneu 3	76
Figura 68 – Forças laterais produzidas pelos pneus do lado esquerdo – pneu 3	77
Figura 69 – Forças verticais sobre as rodas.	78
Figura 70 – Ângulo de <i>roll</i> do veículo.	78
Figura 71 – Ângulo de <i>pitch</i> do veículo.	79
Figura 72 – Ângulo de orientação do veículo	79
Figura 73 – Esterçamento equivalente em função da aceleração lateral do veículo	80
Figura 74 – Posição do centro de gravidade do veículo durante a manobra.	80
Figura 75 – Variação do ângulo de <i>roll</i> da carroceria.	81

Figura 76 – Variação do ângulo de <i>pitch</i> da carroceria.	81
Figura 77 – Variação do ângulo de orientação da carroceria.	81
Figura 78 – Comportamento das forças laterais produzidas pelos pneus.	82
Figura 79 – Força vertical das rodas	82
Figura 80 – Trajetória do centro de gravidade do veículo	83
Figura 81 – Ângulo de <i>roll</i> da carroceria	83
Figura 82 – Ângulo de orientação da carroceria	83
Figura 83 – Ângulo de <i>pitch</i> da carroceria	84
Figura 84 – Ângulo de esterçamento do volante – man 3, susp 1 e 2	85
Figura 85 – Ângulo de esterçamento do volante – man 3, susp 3	85
Figura 86 – Ângulo de <i>roll</i> do veículo durante a manobra	87
Figura 87 – Ângulo de orientação do veículo durante a manobra	87
Figura 88 – Ângulo de <i>pitch</i> do veículo durante a manobra	87
Figura 89 – Âng. dos braços inferiores esquerdos durante a manobra	88
Figura 90 – Âng. dos braços inferiores direitos durante a manobra	88
Figura 91 – Percurso do centro de gravidade do veículo	89
Figura 92 – Altura do centro de gravidade do veículo durante a manobra	89
Figura 93 – Força vertical nas rodas direitas durante a manobra	90
Figura 94 – Força vertical nas rodas esquerdas durante a manobra	90
Figura 95 – Câamber das rodas direitas durante a manobra	91
Figura 96 – Câamber das rodas esquerdas durante a manobra	91
Figura 97 – Ângulo de convergência durante a manobra	91
Figura 98 – Percurso do centro de gravidade do veículo	92
Figura 99 – Ângulo de <i>roll</i> durante a manobra	92
Figura 100 – Ângulo de orientação durante a manobra	92
Figura 101 – Ângulo de <i>pitch</i> durante a manobra	92
Figura 102 – Acel. lat. do veículo (suspensão 1)	93
Figura 103 – Taxa de <i>yaw</i> do veículo (suspensão 1)	93
Figura 104 – Acel. lat. do veículo (suspensão 2)	94
Figura 105 – Taxa de <i>yaw</i> do veículo (suspensão 2)	94
Figura 106 – Acel. lat. do veículo (suspensão 3)	94
Figura 107 – Taxa de <i>yaw</i> do veículo (suspensão 3)	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura dos corpos da suspensão MacPherson.	25
Tabela 2 – Juntas da suspensão MacPherson e graus de liberdade.	25
Tabela 3 – Parâmetros da suspensão	47
Tabela 4 – Massa e momento de inércia do chassi	47
Tabela 5 – Massa e momento de inércia dos corpos da suspensão	47
Tabela 6 – Ângulos da ponteira de direção	47
Tabela 7 – Posição do ponto J de cada suspensão em relação ao CG do chassi . . .	48
Tabela 8 – Dados dos pneus utilizados nas simulações	48
Tabela 9 – Relação entre o esterçamento do volante para o esterçamento da roda .	53
Tabela 10 – Rigidez e constante de amortecimento da suspensão	53
Tabela 11 – Condições iniciais da simulação	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Acel. lat	Aceração lateral
CAEx	Centro de Avaliações do Exército
CG	Centro de gravidade
DD	Roda dianteira direita
DE	Roda dianteira esquerda
ID	Roda intermediária direita
IE	Roda intermediária esquerda
ISO	International Organization for Standardization
MATLAB	Matrix Laboratory
REF	Referencial
SCTEX	Sistema de Ciência e Tecnologia do Exército
SIM	Simulação
TC	Transformador cinemático
TD	Roda traseira direita
TE	Roda traseira esquerda
VBR	Viatura Blindada de Reconhecimento
VBTP-MR	Viatura Blindada de Transporte de Pessoal Média sobre Rodas

LISTA DE SÍMBOLOS

g_i	Equação de restrição i
\underline{g}	Vetor completo de equações de restrição
\mathbf{H}	Matriz de seleção de coordenadas
J_α	Matriz jacobiana absoluta da suspensão
\mathbf{J}_g	Matriz jacobiana global do veículo
\mathbf{J}_{gs}	Matriz jacobiana global da suspensão
\mathbf{J}_r	Matriz jacobiana relativa
\mathbf{J}_β	Matriz jacobiana de restrições de uma cadeia simples
q_i	Coordenada independente i
\underline{q}	Vetor de coordenadas independentes
\mathbf{V}	Matriz de seleção de todas as entradas
\mathbf{V}'	Matriz de seleção dos graus de liberdade de entrada
\mathbf{V}^*	Matriz de seleção de entradas modificada
(fgh)	Referencial da suspensão veicular
$(fgh)'$	Primeiro referencial rotacionado da suspensão veicular
$(fgh)''$	Segundo referencial rotacionado da suspensão veicular
$(fgh)'''$	Terceiro referencial rotacionado da suspensão veicular
(XYZ)	Referencial inercial fixo ao solo
β_i	Equação de restrição i
$\underline{\beta}$	Vetor de coordenadas relativas de junta
ϕ	Ângulo de <i>yaw</i>
θ	Ângulo de <i>pitch</i>
ψ	Ângulo de <i>roll</i>
$\underline{\Lambda}_C$	Vetor posição do corpo i no referencial inercial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivo	17
1.3	Posicionamento do trabalho	18
1.4	Revisão bibliográfica	19
1.4.1	Modelagem por transformadores cinemáticos	19
1.4.2	Modelagem das forças de suspensão da VBTP Guarani	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Sistemas mecânicos	21
2.2	Cadeias cinemáticas	21
2.3	Conceito de transformador cinemático	23
2.4	Suspensão MacPherson e dinâmica veicular	24
2.4.1	Primeiro transformador	26
2.4.2	Segundo transformador	27
2.4.3	Equações de restrição	28
2.4.4	Matriz jacobiana relativa e acoplamento	30
2.4.5	Matriz jacobiana absoluta e velocidades no ref inercial	32
2.4.6	Mudança do ref do chassi para o ref inercial	33
2.4.7	Estudo da dinâmica veicular	39
2.4.8	Esterçamento de veículo com três eixos	43
2.5	Testes de campo	44
3	PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO	47
4	RESULTADO DAS SIMULAÇÕES	57
4.1	Simulações propostas	57
4.2	Veículo sujeito somente à ação do próprio peso	57
4.2.1	Suspensão 1	58
4.2.2	Suspensão 2	65
4.2.3	Suspensão 3	69
4.3	Trajectoria circular em regime permanente	73
4.3.1	Suspensão 1	75
4.3.1.1	Velocidade de 28 km/h	75
4.3.1.2	Velocidade de 60 km/h	80
4.3.2	Suspensões 2 e 3	82

4.4	Manobra evasiva dupla	84
4.4.1	Suspensão 1	86
4.4.2	Suspensões 2 e 3	91
5	COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES COM O TESTE DE CAMPO	93
6	CONCLUSÃO	97
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A – PROGRAMA 1	101
	APÊNDICE B – PROGRAMA 2	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Um veículo no espaço pode ser entendido como um conjunto de corpos unidos por juntas e elementos complacentes, isto é, molas e amortecedores. A modelagem computacional, com a finalidade de estudar o seu comportamento dinâmico diante excitações de base originadas no solo, é uma ferramenta extremamente importante para analisar fatores como o conforto, vibrações e acelerações de pontos de interesse situados no chassi. Junto da construção de protótipos veiculares para testes em campo, a modelagem computacional ocupa um importante papel no desenvolvimento de um veículo.

Considerando os projetos veiculares desenvolvidos pelo Sistema de Ciência e Tecnologia do Exército (SCTEx), o desenvolvimento da Nova Família de Blindados sobre Rodas Guarani ocupa uma posição de destaque, tendo em vista a necessidade de inovação dos blindados atualmente utilizados pela Força Terrestre, além da necessidade de independência tecnológica, desenvolvimento da indústria e tecnologia do país e elevação da capacidade de dissuasão do Exército Brasileiro.

As indústrias de veículos frequentemente fazem uso de programas comerciais dedicados à dinâmica de multicorpos, denominados “pacotes fechados”, permitindo ao usuário estudar a dinâmica veicular a partir de modelos já prontos, agilizando o processo. Porém, muitos destes pacotes possuem alto custo de aquisição. Também vale ressaltar que em pacotes fechados, a influência de um parâmetro sobre o comportamento do conjunto em alguns casos não é clara, assim como o seu efeito dinâmico.

A fim de evitar despesas para adquirir um software comercial, e para se ter a visão de como o mecanismo é encadeado por meio do equacionamento adotado, optou-se por elaborar um algoritmo próprio. O equacionamento da dinâmica veicular e a criação de códigos abertos permitem o conhecimento do modelo, que deixa de ser uma “caixa preta”. Além disso, a praticidade em se utilizar programas de código aberto deixa o usuário com a liberdade de aumentar ou reduzir o grau de sofisticação do modelo segundo seus critérios e necessidades.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo modelar computacionalmente a dinâmica de um veículo de três eixos e estudar o seu comportamento em diferentes simulações. O objetivo das simulações propostas é submeter o veículo a ensaios que permitam analisar a dinâmica

veicular sob variadas condições de condução. Os ensaios simulados são:

- 1) Veículo sujeito somente à ação do próprio peso;
- 2) Trajetória circular em regime permanente;
- 3) Manobra evasiva dupla.

Cada simulação tem um objetivo e dá ênfase a uma determinada característica do modelo.

1.3 Posicionamento do trabalho

Costa Neto (1) apresenta um modelo de veículo com dois eixos, cujas suspensões independentes, do tipo MacPherson, bem como o sistema de direção, com esterçamento nas quatro rodas, são modelados como transformadores cinemáticos. O chassi do veículo, considerado com 3 graus de liberdade (posição vertical, ângulo de *roll* ou rolagem e ângulo de *pitch* ou arfagem) é acoplado a 4 suspensões MacPherson e seus respectivos mecanismos de direção. Em seu modelo de veículo, as dinâmicas lateral e longitudinal do pneu não são consideradas, apenas a vertical. São apresentados diversos resultados de simulações em diversas situações, permitindo a análise do comportamento da dinâmica vertical do veículo e mostrando a sua diferença para o modelo linear, condição esta obtida quando não se considera a configuração da suspensão. Também é apresentada a influência do esterçamento no comportamento cinemático de uma suspensão MacPherson, os chamados movimentos parasitas.

Neves (6), partindo do modelo desenvolvido por Costa Neto (1), avalia a dinâmica lateral do veículo. As forças laterais e longitudinais dos pneus são obtidas a partir da Fórmula Mágica (7) sendo também considerada a interação entre essas forças. O modelo do veículo é submetido a uma série de simulações de manobras, baseadas em procedimentos previstos em normas internacionais. Os resultados obtidos dessas simulações possibilitam a análise da estabilidade lateral do veículo por meio da avaliação do seu comportamento direcional e da sua tendência ao capotamento.

Chagas (8) utiliza os modelos de Costa Neto (1) e Neves (6) e substitui as suspensões MacPherson por suspensões independentes do tipo Duplo A. O modelo computacional desenvolvido é submetido a simulações de manobras prescritas em normas, a fim de verificar o comportamento direcional e tendência ao capotamento com as novas suspensões.

Costa Neto (9) propõe um procedimento de modelagem modular para os subsistemas de um veículo terrestre, em que o grau de detalhamento depende do problema a ser resolvido pelo usuário. Apesar da abordagem modular ser baseada no fluxo de potência usando a metodologia dos grafos de ligação, alguns conceitos de transformadores cinemáticos são aplicados aos sistemas multicorpos.

Campos (10) faz uma análise da dinâmica vertical da Viatura Blindada de Transporte de Pessoal da Família Média Sobre Rodas 6x6 Guarani. Baseada em testes de campo, onde a viatura transpõe uma série de obstáculos em pistas conhecidas, e em um modelo matemático desenvolvido na plataforma MATLAB/Simulink, são realizadas estimativas dos parâmetros das curvas de rigidez e dos coeficientes de amortecimento para as condições de *bump* e *rebound* da suspensão do tipo MacPherson utilizando o método estocástico de otimização por enxame de partículas (PSO) na solução do problema inverso.

O presente trabalho tem por finalidade dar prosseguimento aos trabalhos citados, utilizando a mesma técnica de transformadores cinemáticos utilizada por Costa Neto, Neves e Chagas para o estudo cinemático do veículo. A viatura em estudo é a mesma que a estudada por Campos, a VBTP-MR Guarani. No presente trabalho, a viatura executa uma manobra evasiva dupla a baixas velocidades, e os resultados são comparados com dados obtidos de um teste de campo nas mesmas condições. A suspensão em cada roda é do tipo MacPherson, sendo considerada a sua configuração na cinemática da suspensão com o uso de transformadores cinemáticos. Já o sistema de direção é diferente do usado no Guarani, tendo sido aproveitado o desenvolvido e modelado por Costa Neto, opção esta que se deve ao alto grau de complexidade do mecanismo usado na viatura.

1.4 Revisão bibliográfica

1.4.1 Modelagem por transformadores cinemáticos

A modelagem por transformadores cinemáticos deste trabalho tomou como base os trabalhos de Costa Neto (1), Neves (6) e Chagas (8), citados em 1.3.

1.4.2 Modelagem das forças de suspensão da VBTP Guarani

Pedroso (11) obteve curvas de rigidez, para cada um dos três eixos de um veículo. O amortecimento não foi modelado integralmente ao sistema pneumático, sendo um elemento de força inserido em paralelo à rigidez. As curvas apresentadas por Pedroso (2009) foram obtidas através de simulações no software MSC Adams®, considerando-se calibrações específicas para cada um dos três eixos.

Campos (10) também estima os parâmetros das curvas de rigidez e dos coeficientes de amortecimento para as condições de *bump* e *rebound* da suspensão do tipo MacPherson da VBTP Guarani, utilizando o método estocástico de otimização por enxame de partículas (PSO) na solução do problema inverso

Domprobst (12) apresenta trabalhos da Michelin sobre o impacto do pneu no desempenho direcional de veículos pesados, correlacionando testes de campo com um

modelo de veículo desenvolvido no Trucksim®. Nesse contexto, Domprobst apresenta uma curva não linear de variação do *cornering stiffness* em função da carga sobre a roda.

Babulal (13) estabelece uma relação entre a força lateral e o ângulo de desvio para um pneu Michelin utilizado em veículos pesados off-road, estimando parâmetros que são utilizados em diversos modelos de pneu, a saber: Fiala, UA, Pacejka 89 e FTire. Para o primeiro modelo, é estimado o *cornering stiffness* do pneu.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas mecânicos

Um sistema mecânico pode ser entendido como um conjunto de corpos interconectados que apresentam movimento relativo, movimento este que é dependente das juntas que os unem.

O estudo da cinemática e da dinâmica de sistemas mecânicos permite a obtenção, respectivamente, de equações algébricas de restrição relativas à geometria do sistema e de equações diferenciais relativas às forças atuantes. Em conjunto, ambos os estudos permitem a obtenção de equações de movimento, determinando as posições e velocidades dos componentes de interesse do sistema mecânico.

A cinemática e dinâmica de sistemas mecânicos multicorpos fazem parte de um ramo de estudo relevante da engenharia. Em seu estudo, a complexidade das equações obtidas através de modelos matemáticos impossibilita a obtenção analítica de soluções. Para solucionar este problema, utilizam-se métodos numéricos implementados computacionalmente.

Neste capítulo, tem-se a finalidade de apresentar a técnica dos transformadores cinemáticos para a modelagem de sistemas multicorpos, conforme Costa Neto (1) e Sarzeto (14). Este método tem por objetivo a obtenção de soluções fechadas para a cinemática incorporando-as ao procedimento de geração de um número mínimo de equações de movimento, permitindo a obtenção de um modelo computacional mais eficiente.

2.2 Cadeias cinemáticas

Uma característica significativa de um sistema mecânico multicorpos é a existência de cadeias cinemáticas, que são aquelas que unem os corpos do mecanismo, podendo ser classificadas em três tipos, a saber: em série, em árvore e em fechado.

Nas cadeias em série todos os corpos do mecanismo são ligados, em suas extremidades, a um único corpo do mecanismo, com exceção dos corpos do início e do fim, que são ligados a um corpo em uma de suas extremidades, e na outra extremidade não se ligam a nenhum corpo, de acordo com a figura 1.

Já nas cadeias em árvore, semelhantes às cadeias em série, os corpos podem se ligar, em suas extremidades a mais de um corpo, de acordo com a figura 2.

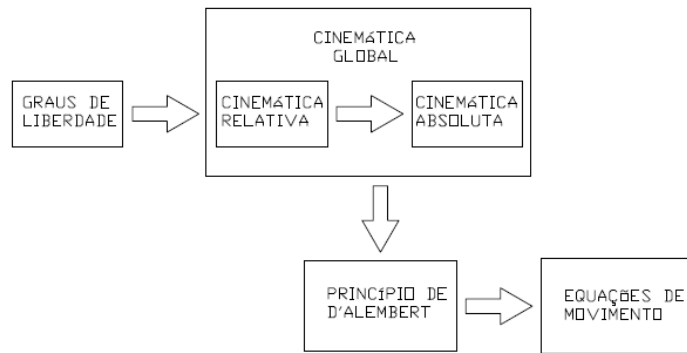


Figura 4 – Solução de um mecanismo de cadeia fechada (1)

2.3 Conceito de transformador cinemático

O conceito de transformador cinemático foi inicialmente proposto por Hiller, Kecskeméthy e Woernle (15). Os autores usam matrizes jacobianas, chamadas de transformadores cinemáticos, para representar todas as velocidades absolutas dos corpos do mecanismo em função de um conjunto mínimo de variáveis, que correspondem aos seus graus de liberdade.

Os transformadores cinemáticos permitem o estudo da cinemática de um sistema mecânico utilizando o menor número de equações, simplificando o cálculo computacional e minimizando o tempo de processamento.

Aplicando o transformador cinemático em um problema de cinemática inversa para um manipulador robótico espacial, Hiller e Woernle (16) desenvolvem a ideia de par característico de juntas, que são juntas necessárias para obter as equações de fechamento das cadeias cinemáticas. As equações de fechamento são obtidas por meio dos chamados parâmetros de fechamento, invariantes geométricos dependentes do par característico escolhido.

A utilização dos transformadores cinemáticos associados às equações de D'Alembert para o estudo da dinâmica, como proposto por Hiller e Kecskeméthy (17), permite solucionar a configuração de um mecanismo ao longo do tempo.

Analisando de uma forma mais abrangente, na linha de estudo de dinâmica veicular destacam-se o método por grafos de ligação e o método por transformadores cinemáticos.

O método dos grafos de ligação é um método gráfico que permite visualizar as relações entre velocidades absolutas e esforços no sistema dinâmico sem que precise formular todo o equacionamento de antemão. Costa Neto (9) faz um estudo da modelagem e integração dos mecanismos de suspensão e direção de veículos terrestres usando fluxo de potência, sendo tal abordagem baseada na metodologia dos grafos de ligação, usada para obter as Matrizes de Vínculos Cinemáticos que caracterizam, por sua vez, os transformadores

cinemáticos que representam os mecanismos adotados no trabalho.

O método por transformadores cinemáticos possui a vantagem que o número de equações de movimento é igual ao número de graus de liberdade do sistema físico. Porém, o método não permite uma fácil visualização das relações de causa e efeito do fenômeno físico tal como a técnica dos grafos de ligação. As equações da cinemática e dinâmica, introduzidas nos elementos de matrizes extensas, não facilitam a visualização destas relações, ainda mais quando o sistema dinâmico estudado é complexo, aumentando a extensão dessas matrizes. Somado a este fator está a utilização de operações matriciais como jacobiana, inversão e derivação de matrizes, obtidas por cálculos simbólicos, e até mesmo numéricos quando a complexidade é maior.

Apesar disso, o método dos transformadores cinemáticos é um método de rápido processamento computacional. Uma vez obtidas as matrizes jacobianas, inversas e derivadas simbolicamente, obtêm-se expressões bem definidas, havendo somente o trabalho computacional de substituição de valores e multiplicação de matrizes. Somado a este fato está o reduzido número de equações.

Com transformadores cinemáticos considera-se a configuração dos mecanismos das suspensões e do sistema de direção, tendo em vista a obtenção das equações cinemáticas a partir das relações geométricas que resultam por sua vez dos vínculos entre os corpos do mecanismo, tornando o modelo computacional mais próximo da realidade e evitando aproximações lineares típicas de modelos computacionais mais simples.

2.4 Suspensão MacPherson e dinâmica veicular

A figura 5 apresenta o mecanismo de uma suspensão dianteira direita tipo MacPherson (1). A suspensão é vinculada ao chassi nos pontos O, A e C. A caixa de direção, do tipo pinhão e cremalheira, é aparafusada ao chassi no ponto L, localizado em sua linha central. O ponto F é a projeção do ponto D na linha BC, que representa o eixo longitudinal da coluna telescópica. O ponto J é a projeção de B na linha AO, que é o eixo em torno do qual o braço inferior AOB gira.

As tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, o nome de cada elemento da suspensão/junta e os seus graus de liberdade.

As demais suspensões são modeladas similarmente à suspensão da posição dianteira direita.

São considerados como graus de liberdade do mecanismo da Figura 5: o deslocamento angular do braço inferior em relação ao chassi (q_1); a rotação da roda em torno de 7 (q_2) e o deslocamento linear da cremalheira (q_3).

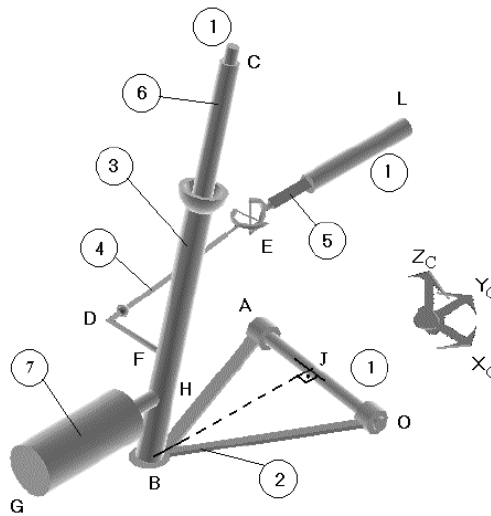


Figura 5 – Suspensão dianteira direita tipo MacPherson (1)

Tabela 1 – Nomenclatura dos corpos da suspensão MacPherson.

Número	Nomenclatura
1	Chassi
2	Braço inferior
3	Parte inferior da coluna telescópica
4	Barra de direção
5	Cremalheira de direção
6	Parte superior da coluna telescópica
7	Ponteira do eixo

Tabela 2 – Juntas da suspensão MacPherson e graus de liberdade.

Número	Tipo de junta	Número de graus de liberdade
Eixo OA	Revolução	1
Centro B	Esférica	3
Eixo BC	Telescópica	2
Centro C	Universal	2
Centro D	Esférica	3
Centro E	Universal	2
Eixo Y	Translação	1
Eixo HG	Revolução	1

O referencial da suspensão é representado pelos vetores unitários \underline{f} , \underline{g} e \underline{h} , com origem no ponto J. O vetor \underline{f} é o vetor unitário orientado de O até A. O vetor \underline{g} é o vetor unitário perpendicular ao vetor \underline{f} e ao vetor \underline{z}_C do referencial do chassi, sendo obtido do produto vetorial $\underline{\tilde{z}}_C \cdot \underline{f}$ e dividido pelo módulo deste produto. Por último, o vetor \underline{h} é perpendicular aos vetores \underline{f} e \underline{g} , obtido do produto vetorial $\underline{\tilde{f}} \cdot \underline{g}$ dividido pelo módulo deste produto.

$$\underline{f} = \frac{OA}{|OA|} \quad (2.1)$$

$$\underline{g} = \frac{\tilde{z}_C \cdot \underline{f}}{|\tilde{z}_C \cdot \underline{f}|} \quad (2.2)$$

$$\underline{h} = \frac{\tilde{f} \cdot \underline{g}}{|\tilde{f} \cdot \underline{g}|} \quad (2.3)$$

Além do referencial (fgh) , define-se mais um referencial, $(fgh)'''$, obtido pela sequência de rotações 3–1–3 do primeiro referencial (ângulos de Euler), ou seja, a primeira rotação em torno do eixo \underline{h} , obtendo-se os eixos \underline{f}' , \underline{g}' e \underline{h}' , a segunda rotação é feita em torno do eixo \underline{f}' , obtendo-se o referencial \underline{f}'' , \underline{g}'' e \underline{h}'' e a terceira rotação em torno de \underline{h}'' , obtendo-se os eixos \underline{f}''' , \underline{g}''' e \underline{h}''' . É conveniente ressaltar que o segundo referencial, $(fgh)''$, está orientado de tal maneira que o eixo \underline{h}'' coincide com a direção de BC. Este novo referencial é necessário, tendo em vista a inclinação da coluna telescópica.

Ao final das três rotações, o novo referencial $(fgh)'''$ é transladado ao ponto H, sua origem. Uma vez definido o novo referencial, parte-se para a modelagem da suspensão pelos transformadores cinemáticos.

O conjunto da figura 5 é dividido em dois transformadores, um referente ao mecanismo de suspensão, e o outro ao mecanismo de direção. A coluna telescópica é o elemento comum aos dois transformadores.

2.4.1 Primeiro transformador

O primeiro transformador engloba o movimento natural da suspensão e inclui os corpos 1, 2, 3, 6 e 7, tendo dois graus de liberdade, que são o deslocamento angular do braço inferior e a rotação da roda em torno de seu eixo (*spin*). A figura 6 mostra as coordenadas de junta β_i e os corpos envolvidos nesse transformador.

As coordenadas relativas de juntas β_1 , β_2 , β_3 e β_4 são, respectivamente, a rotação do braço inferior em torno do eixo AO, a translação entre os corpos 3 e 6 medida ao longo da linha BC, o segundo ângulo de Euler e, finalmente, o primeiro ângulo de Euler. A quinta coordenada de junta, β_5 , é o deslocamento angular da roda em torno de HG.

A terceira rotação de Euler para o caso deste transformador cinemático é desnecessária, uma vez que a rotação relativa entre os corpos 3 e 6 não é estudada. Porém, é relevante no segundo, pois resulta do movimento da cremalheira.

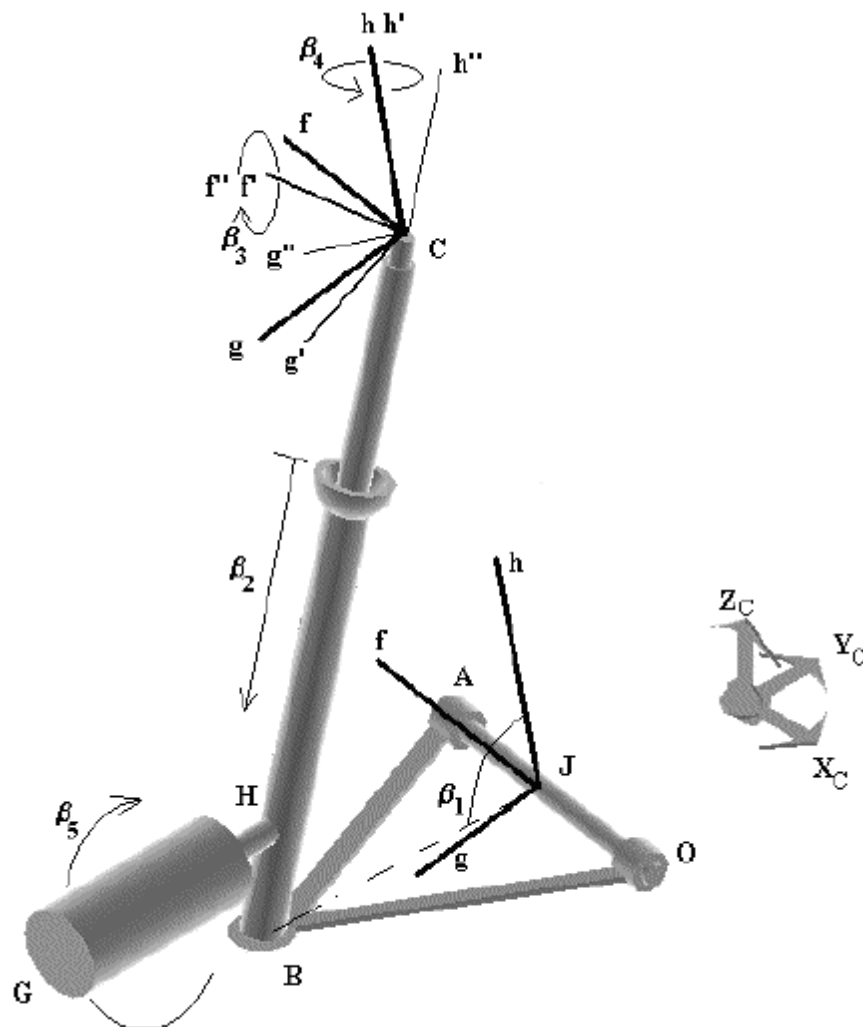


Figura 6 – Coordenadas e corpos envolvidos no 1º TC (1)

2.4.2 Segundo transformador

O segundo transformador engloba o esterçamento da roda comandado pela cremalheira da caixa de direção, envolvendo os corpos 1, 3, 4, 5 e 6, e possuindo apenas um grau de liberdade, que é o deslocamento da cremalheira em relação ao chassi. A figura 7 mostra as coordenadas de junta β_i e os corpos envolvidos nesse transformador.

As coordenadas de juntas β_6 , β_7 e β_8 são respectivamente iguais a β_2 , β_3 e β_4 , caracterizando assim o acoplamento entre os dois transformadores. A quarta coordenada de junta β_9 corresponde ao deslocamento da cremalheira. A quinta coordenada de junta β_{10} representa a rotação relativa entre os corpos 3 e 6.

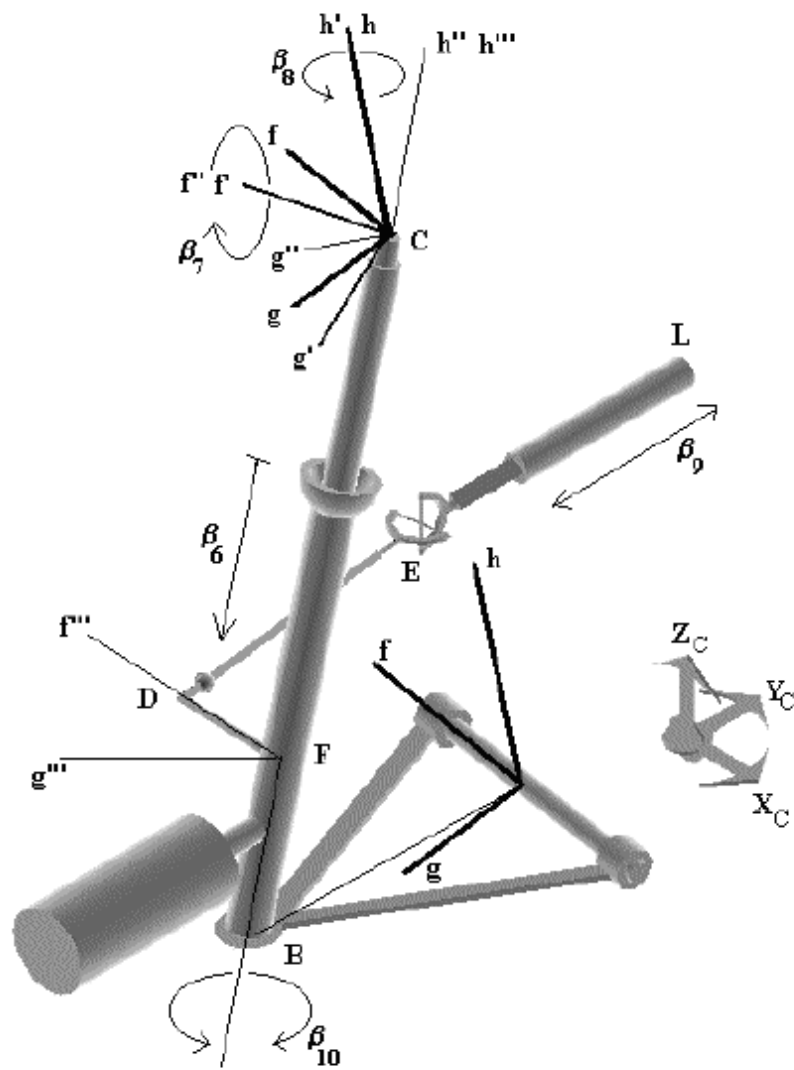


Figura 7 – Coordenadas e corpos envolvidos no 2º TC (1)

2.4.3 Equações de restrição

A rotação da bandeja em torno da linha AO é a primeira coordenada relativa de junta, isto é, β_1 . E o deslocamento angular da roda representa a quinta coordenada relativa de junta, β_5 . Estas duas coordenadas relativas são consideradas graus de liberdade do transformador cinemático, isto é, q_1 e q_2 . Dessa forma, obtêm-se duas equações de restrição:

$$g_1 = \beta_1 - q_1 = 0 \quad (2.4)$$

$$g_5 = \beta_5 - q_2 = 0 \quad (2.5)$$

Sabendo que \underline{BC} (comprimento total da coluna telescópica) é um vetor de módulo variável em função da compressão da suspensão, tem-se que:

$$|\underline{BC}| - p + \beta_2 = 0 \quad (2.6)$$

Onde p é o comprimento máximo que o tirante telescópico, ou o vetor \underline{BC} , pode ter.

Utilizando a lei dos cossenos no triângulo JCB, é possível encontrar o comprimento de \underline{BC} em função do ângulo β_1 no vértice J, obtendo a segunda equação de restrição:

$$g_2 = \beta_2 - p + \sqrt{|\underline{JC}|^2 + |\underline{JB}|^2 \mp 2 \cdot |\underline{JB}| \cdot (\underline{JC}_g \cdot \text{sen}(\beta_1) \pm \underline{JC}_h \cdot \text{cos}(\beta_1))} \quad (2.7)$$

Considerando o vetor unitário na direção de \underline{BC} , multiplica-se este vetor pela matriz de rotações 3-1-3 do primeiro referencial, e como resultado do produto chega-se às seguintes expressões para os ângulos β_3 e β_4 :

$$g_3 = \beta_3 - \text{cos}^{-1} \left(\frac{\underline{JC}_h - |\underline{JB}| \cdot \text{cos}(\beta_1)}{p - \beta_2} \right) \quad (2.8)$$

$$g_4 = \beta_4 - \text{tan}^{-1} \left(\frac{\underline{JC}_f}{|\underline{JB}| \cdot \text{sen}(\beta_1) - \underline{JC}_g} \right) \quad (2.9)$$

Passa-se agora para as equações do segundo transformador cinemático. Três coordenadas relativas do primeiro e segundo transformador cinemático são iguais, a saber: β_6 , β_7 e β_8 . Portanto, tem-se três equações de restrição:

$$g_6 = \beta_6 - \beta_2 = 0 \quad (2.10)$$

$$g_7 = \beta_7 - \beta_3 = 0 \quad (2.11)$$

$$g_8 = \beta_8 - \beta_4 = 0 \quad (2.12)$$

A quarta coordenada de junta do segundo transformador é o terceiro grau de liberdade, ou seja, o deslocamento da cremalheira:

$$g_9 = \beta_9 - q_3 = 0 \quad (2.13)$$

Por fim, a coordenada de junta β_{10} envolve a soma de cinco vetores e duas transformações de coordenadas:

$$\underline{CL} + \underline{LE} = \underline{CF} + \underline{FD} + \underline{DE} \quad (2.14)$$

Onde \underline{CL} é um vetor fixo, já que pertence ao chassi, o vetor \underline{DE} tem comprimento constante, o vetor \underline{LE} é paralelo ao eixo y do referencial do chassi. Dessa forma, obtém-se a última equação de restrição:

$$g_{10} = [\beta_{10}] - \frac{\pi}{2} \cdot [\text{sgn}[(\text{sen}\beta_{10})]_i - 1] + \cos^{-1}[\text{sgn}[\text{sen}\beta_{10}]_i \cdot [\cos\beta_{10}]_i] = 0 \quad (2.15)$$

As equações 2.4 a 2.9 compõem o vetor de equações de fechamento do primeiro transformador cinemático, enquanto as equações 2.10 a 2.15 formam o segundo transformador.

2.4.4 Matriz jacobiana relativa e acoplamento

Obtidas as dez equações de restrição g_1 a g_{10} , das quais as cinco primeiras pertencem ao primeiro transformador cinemático e as demais pertencem ao segundo transformador, define-se o conjunto completo de equações de restrição do primeiro e segundo transformador, respectivamente iguais a \underline{g}_1 e \underline{g}_2 , por:

$$\underline{g}_1 = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\underline{g}_2 = \begin{bmatrix} g_6 \\ g_7 \\ g_8 \\ g_9 \\ g_{10} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

O vetor de coordenadas relativas de junta do primeiro e segundo transformador, respectivamente iguais a $\underline{\beta}_1$ e $\underline{\beta}_2$, são dados por:

$$\underline{\beta}_1 = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\underline{\beta}_2 = \begin{bmatrix} \beta_6 \\ \beta_7 \\ \beta_8 \\ \beta_9 \\ \beta_{10} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

O vetor de coordenadas independentes do sistema de suspensão \underline{q} é o vetor constituído pelos graus de liberdade de cada suspensão, isto é, q_1 , q_2 e q_3 :

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

As matrizes de restrição do primeiro e segundo transformador, respectivamente iguais a \mathbf{J}_{β_1} e \mathbf{J}_{β_2} , são calculadas por:

$$\mathbf{J}_{\beta_1} = \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\beta}_1} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{J}_{\beta_2} = \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\beta}_2} \quad (2.22)$$

As matrizes \mathbf{V}_1 e \mathbf{V}_2 , denominadas matrizes de seleção de todas as entradas, são matrizes compostas de elementos 0 e 1, obtidas por:

$$\mathbf{V}_1 = -\frac{\partial g_1}{\partial \underline{q}} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{V}_2 = -\frac{\partial g_2}{\partial \underline{q}} \quad (2.24)$$

Considerando as equações 2.4 a 2.15, tem-se:

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

A matriz de acoplamento \mathbf{C}_{21} é o oposto da matriz obtida por meio da relação entre as coordenadas relativas do segundo com o primeiro transformador. Considerando as equações 2.4 a 2.15, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \beta_6 \\ \beta_7 \\ \beta_8 \\ \beta_9 \\ \beta_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{bmatrix} = -\mathbf{C}_{21} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Por fim, a matriz jacobiana relativa \mathbf{J}_r é obtida por:

$$\mathbf{J}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\beta 1} & 0 \\ \mathbf{C}_{12} & \mathbf{J}_{\beta 2} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

2.4.5 Matriz jacobiana absoluta e velocidades no ref inercial

As velocidades linear e angular de um elemento i da suspensão no referencial da própria suspensão (fgh), respectivamente iguais a $\underline{\dot{r}}_i$ e $\underline{\omega}_i$, podem ser expressas como uma combinação linear das derivadas das coordenadas relativas deste mecanismo $\dot{\beta}_1$ a $\dot{\beta}_{10}$:

$$\begin{bmatrix} \underline{\dot{r}}_i \\ \underline{\omega}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{a}_1 & \dots & \underline{a}_{10} \\ \underline{b}_1 & \dots & \underline{b}_{10} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\beta}_1 \\ \dots \\ \dot{\beta}_{10} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Juntando os vetores de todos os corpos i , obtém-se a matriz jacobiana absoluta \mathbf{J}_a :

$$\mathbf{J}_a = \begin{bmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{a}_{21} & \dots & \underline{a}_{101} \\ \underline{b}_{11} & \underline{b}_{21} & \dots & \underline{b}_{101} \\ \underline{a}_{12} & \underline{a}_{22} & \dots & \underline{a}_{102} \\ \underline{b}_{12} & \underline{b}_{22} & \dots & \underline{b}_{102} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{a}_{1n_c} & \underline{a}_{2n_c} & \dots & \underline{a}_{10n_c} \\ \underline{b}_{1n_c} & \underline{b}_{2n_c} & \dots & \underline{b}_{10n_c} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Onde n_c é o número de corpos da suspensão analisados. Os elementos da suspensão utilizados para obter a matriz jacobiana absoluta da suspensão MacPherson são os corpos 1, 2, 3 e 7. Uma vez obtidas as matrizes jacobianas absoluta \mathbf{J}_a e relativa \mathbf{J}_r de cada suspensão, a matriz jacobiana global de cada suspensão no referencial do chassi $\mathbf{J}_{g,s}$ é calculada por:

$$\mathbf{J}_{g,s} = \mathbf{J}_a \cdot \mathbf{J}_r \quad (2.31)$$

2.4.6 Mudança do ref do chassi para o ref inercial

As velocidades linear e angular de um elemento i da suspensão no referencial inercial $(XYZ)_I$, respectivamente iguais a $\dot{\underline{r}}_i^I$ e $\underline{\omega}_i^I$, podem ser expressas por:

$$\dot{\underline{r}}_i^I = \dot{\underline{r}}_0^I + \mathbf{A}_c \cdot \dot{\underline{r}}_i^c - \tilde{\underline{\Lambda}}_c \cdot \underline{\omega}_0^I \quad (2.32)$$

$$\underline{\omega}_i^I = \underline{\omega}_0^I + \mathbf{A}_c \cdot \underline{\omega}_i^c \quad (2.33)$$

Onde $\dot{\underline{r}}_0^I$ é a velocidade do chassi em relação ao referencial inercial, $\dot{\underline{r}}_i^c$ é a velocidade do elemento i da suspensão no referencial do chassi, $\underline{\omega}_0^I$ é a velocidade do chassi no referencial inercial, $\underline{\omega}_i^c$ é a velocidade angular do elemento i da suspensão no referencial do chassi, \mathbf{A}_c é a matriz de transformação do referencial do chassi $(XYZ)_c$ para o referencial inercial $(XYZ)_i$ dada por:

$$\underline{\mathbf{A}}_c = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$a_{11} = \cos(\phi) \cdot \cos(\theta)$$

$$a_{12} = -\sin(\phi) \cdot \cos(\psi) + \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\psi)$$

$$a_{13} = \sin(\phi) \cdot \sin(\psi) + \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\psi)$$

$$a_{21} = \sin(\phi) \cdot \cos(\theta)$$

$$a_{22} = \cos(\phi) \cdot \cos(\psi) + \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\psi)$$

$$a_{23} = -\cos(\phi) \cdot \sin(\psi) + \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\psi)$$

$$a_{31} = \sin(\theta)$$

$$a_{32} = \cos(\theta) \cdot \sin(\psi)$$

$$a_{33} = \cos(\theta) \cdot \cos(\psi)$$

Onde os ângulos θ , ψ e ϕ são respectivamente iguais aos ângulos de *pitch*, *roll* e *yaw* do veículo.

O vetor $\underline{\Lambda}_c$ é o vetor posição do corpo i no referencial inercial, calculado por:

$$\underline{\Lambda}_c = \mathbf{A}_c \cdot \underline{r}_i^c \quad (2.35)$$

Representa-se na forma matricial as velocidades linear e angular do elemento i no referencial inercial da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_i^I \\ \underline{\omega}_i^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\tilde{\Lambda}_c & \mathbf{A}_c & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{r}_0^I \\ \underline{\omega}_0^I \\ \dot{r}_i^c \\ \underline{\omega}_i^c \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

sendo $\tilde{\Lambda}_c$ o vetor $\underline{\Lambda}_c$ representado como matriz antissimétrica.

Com a finalidade de facilitar a representação, define-se \mathbf{K}_i a matriz de velocidade de transporte do corpo i :

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \tilde{\Lambda}_c \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

E \mathbf{R}_i é a matriz de transformação de todas as coordenadas do corpo i do referencial do chassi para o referencial inercial:

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_c & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Combinando as equações 2.36 a 2.38, obtém-se a velocidade de cada elemento da suspensão no referencial inercial por:

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_i^I \\ \underline{\omega}_i^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_i & \mathbf{R}_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{r}_0^I \\ \underline{\omega}_0^I \\ \dot{r}_i^c \\ \underline{\omega}_i^c \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

O chassi, por sua vez, é considerado um corpo rígido com seis graus de liberdade: três de posição (q_x , q_y e q_z) e três de orientação (ângulos de *pitch*, *roll* e *yaw*, respectivamente iguais a θ , ψ e ϕ). Como o chassi é representado por apenas um corpo, não possui equações de restrição e portanto não possui jacobiana relativa. Para a sua modelagem, basta determinar a sua jacobiana global, determinando suas velocidades lineares e angulares em relação ao referencial inercial, derivando em relação ao tempo de seus graus de liberdade.

A velocidade linear do centro de massa do chassi é:

$$\underline{\dot{r}}_c^I = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_x \\ \dot{q}_y \\ \dot{q}_z \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

A velocidade angular do chassi em relação ao referencial inercial é obtida a partir de:

$$\underline{\tilde{\omega}}_c^I = \dot{\mathbf{A}}_c \cdot \mathbf{A}_c^T \quad (2.41)$$

Manipulando a equação 2.41, o vetor velocidade angular é calculado em função das derivadas dos ângulos de orientação por:

$$\underline{\omega}_c^I = \begin{bmatrix} 0 & -\text{sen}(\phi) & \text{cos}(\phi) \cdot \text{cos}(\theta) \\ 0 & \text{cos}(\phi) & \text{sen}(\phi) \cdot \text{cos}(\theta) \\ 0 & 0 & -\text{sen}(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{G}_c \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Uma vez descritas as velocidades linear e angular em função dos graus de liberdade, a matriz jacobiana de restrição entre o chassi e o referencial inercial é composta pelas matrizes das equações 2.40 e 2.42:

$$\mathbf{J}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}_c \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Define-se o vetor de velocidades linear e angular dos corpos 3 e 7 da suspensão xx por:

$$\underline{\dot{S}}_{xx}^I = \begin{bmatrix} \dot{r}_3^I \\ \underline{\omega}_3^I \\ \dot{r}_7^I \\ \underline{\omega}_7^I \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Define-se o vetor de velocidades linear e angular do chassi por:

$$\underline{\dot{S}}_0^I = \begin{bmatrix} \dot{r}_c^I \\ \underline{\omega}_c^I \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Por fim, tem-se que as velocidades linear e angular do chassi ($\underline{\dot{S}}_0^I$) e as velocidades linear e angular de todos os corpos da suspensão xx ($\underline{\dot{S}}_{xx}^I$) escritas no referencial inercial são representadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{S}}_0^I \\ \dot{\underline{S}}_{DD}^I \\ \dot{\underline{S}}_{DE}^I \\ \dot{\underline{S}}_{ID}^I \\ \dot{\underline{S}}_{IE}^I \\ \dot{\underline{S}}_{TD}^I \\ \dot{\underline{S}}_{TE}^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_6 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{DD} & \mathbf{R}_{DD} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{DE} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{DE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{ID} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{IE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{TD} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{IE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{TE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{TD} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{TE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{TE} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{J}_0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{DD} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{DE} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{ID} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{IE} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{TD} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{TE} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\underline{q}}_0 \\ \dot{\underline{q}} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Onde \mathbf{K}_{XX} é uma matriz da suspensão xx composta das matrizes \mathbf{K}_i (equação 2.37) dos corpos 3 e 7 e dimensão 12 x 6:

$$\mathbf{K}_{xx} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{3xx} \\ \mathbf{K}_{7xx} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

E \mathbf{R}_{xx} é uma matriz da suspensão xx composta das matrizes \mathbf{R}_i (equação 2.38) dos corpos 3 e 7 e dimensão 12 x 12:

$$\mathbf{R}_{xx} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3xx} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{7xx} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

O vetor $\dot{\underline{q}}_0$ é o vetor da derivada dos graus de liberdade do chassi no referencial inercial, isto é, da posição x, y e z do veículo no referencial inercial (q_x , q_y e q_z , respectivamente) e dos ângulos de *pitch*, *roll* e *yaw* (θ , ψ e ϕ , respectivamente):

$$\dot{\underline{q}}_0 = \begin{bmatrix} \dot{q}_x \\ \dot{q}_y \\ \dot{q}_z \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

E $\dot{\underline{q}}$ é a derivada do vetor dos graus de liberdade de todas as suspensões.

$$\dot{\underline{q}} = \begin{bmatrix} \dot{q}_{DD} \\ \dot{q}_{DE} \\ \dot{q}_{ID} \\ \dot{q}_{IE} \\ \dot{q}_{TD} \\ \dot{q}_{TE} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Onde $\underline{\dot{q}}_{xx}$ é a derivada do vetor dos graus de liberdade q_1 e q_2 da suspensão xx:

$$\underline{\dot{q}}_{xx} = \begin{bmatrix} \dot{q}_{1xx} \\ \dot{q}_{2xx} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Assim, a equação 2.46 pode ser reescrita definindo as matrizes MKR, MAC e matriz jacobiana global do veículo \mathbf{J}_g , da seguinte forma:

$$\mathbf{MKR} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_6 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{DD} & \mathbf{R}_{DD} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{DE} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{DE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{ID} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{IE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{TD} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{IE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{TE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{TD} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{TE} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{TE} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$\mathbf{MAC} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{DD} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{DE} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{ID} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{IE} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{TD} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{TE} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

$$\mathbf{J}_g = \mathbf{MKR} \cdot \mathbf{MAC} \quad (2.54)$$

Portanto, a matriz \mathbf{J}_g relaciona as velocidades dos corpos no referencial inercial com os graus de liberdade do sistema.

$$\begin{bmatrix} \underline{\dot{S}}_0^I \\ \underline{\dot{S}}_{DD}^I \\ \underline{\dot{S}}_{DE}^I \\ \underline{\dot{S}}_{ID}^I \\ \underline{\dot{S}}_{IE}^I \\ \underline{\dot{S}}_{TD}^I \\ \underline{\dot{S}}_{TE}^I \end{bmatrix} = \mathbf{J}_g \cdot \begin{bmatrix} \underline{\dot{q}}_0 \\ \underline{\dot{q}} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

A matriz \mathbf{J}_g é uma matriz de dimensão 78x18, e informa todas as características geométricas do veículo. É a matriz responsável pela cinemática do veículo no equacionamento da dinâmica. Para a completa inclusão das propriedades cinemáticas nas equações

de movimento, ainda é necessária a determinação da primeira derivada em relação ao tempo da jacobiana global do veículo.

A figura 8 representa esquematicamente o método dos transformadores cinemáticos no processo de obtenção das equações de movimento.

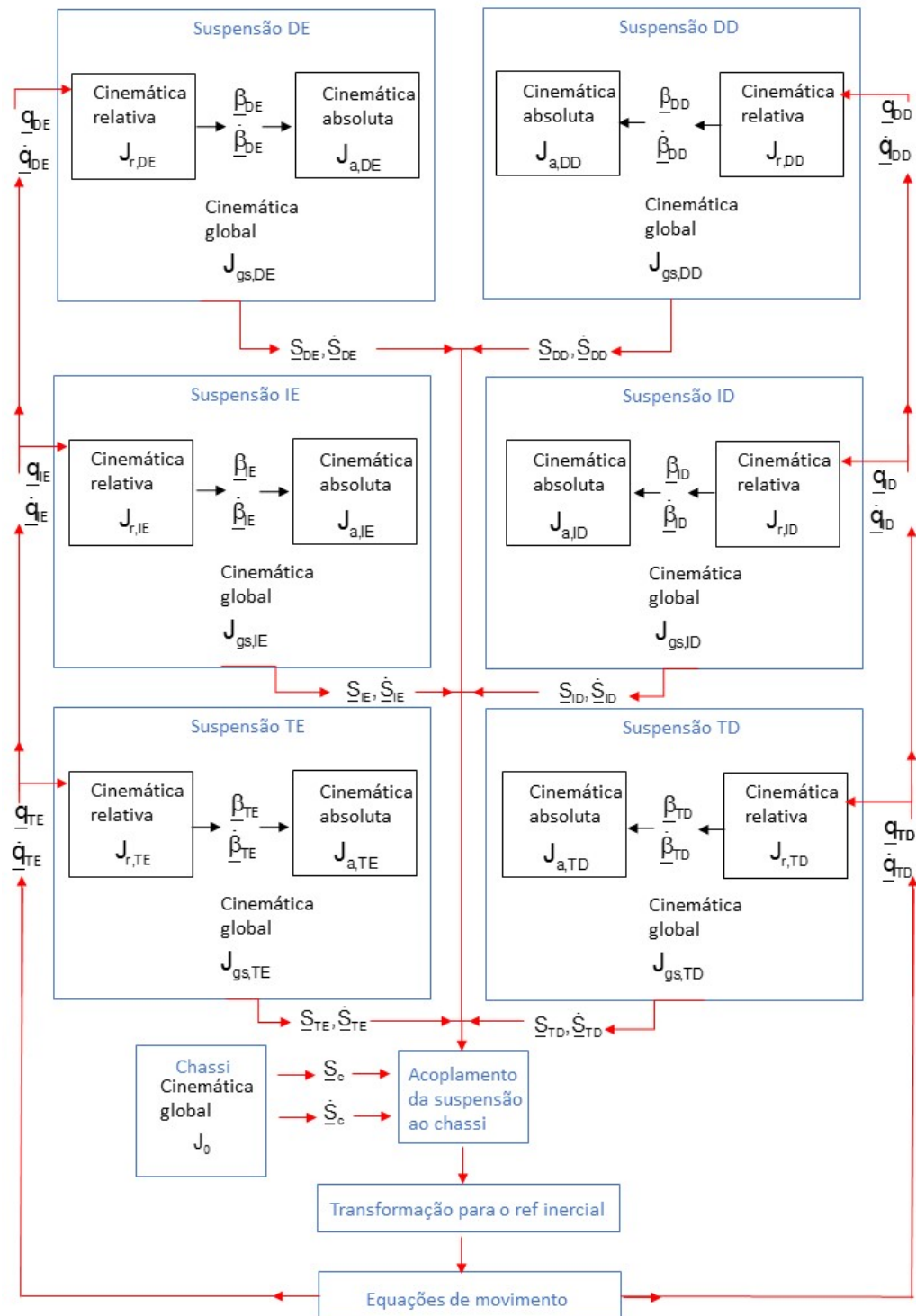


Figura 8 – Diagrama de blocos – método dos transformadores cinemáticos

2.4.7 Estudo da dinâmica veicular

Uma vez equacionada a cinemática, inicia-se o estudo dinâmico, onde são analisadas as forças atuantes no sistema. No caso deste trabalho, tem-se as seguintes forças atuantes:

a) Peso dos corpos

O centro de massa do braço inferior, CG_1 , é localizado no seu baricentro, assumindo um corpo homogêneo. O centro de massa da coluna telescópica, CG_2 , é localizado na interseção dela com o eixo da roda. O centro de massa da roda, CG_3 , é localizado no seu centro geométrico, assumindo uma distribuição homogênea de massa conforme apresentado na figura 9.

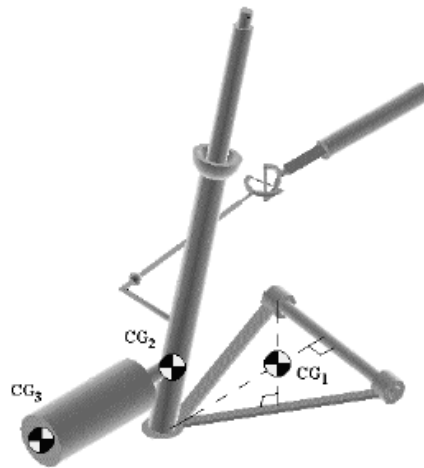


Figura 9 – Localização dos centros de massa (1)

b) Forças do pneu

De acordo com Gillespie (18), quando submetido a condições de esterçamento, o pneu sofre um desvio lateral calculado pelo ângulo de desvio (α), ângulo medido entre a direção longitudinal do pneu e o seu vetor velocidade. Este ângulo está representado na 10, onde F_x , F_y e F_z representam as forças do pneu nos três eixos coordenados e M_x , M_y e M_z os momentos nestes mesmos eixos.

Para pequenos ângulos de desvio, menores que 8 graus, a força lateral desenvolvida pelo pneu, F_y , é diretamente proporcional a este ângulo, de acordo com Vorotovic (3).

$$F_y = C_\alpha \cdot \alpha \quad (2.56)$$

A constante de proporcionalidade C_α é conhecida por *cornering stiffness*, sendo definida como o coeficiente angular da curva de força lateral em função do ângulo de desvio, para α igual a zero.

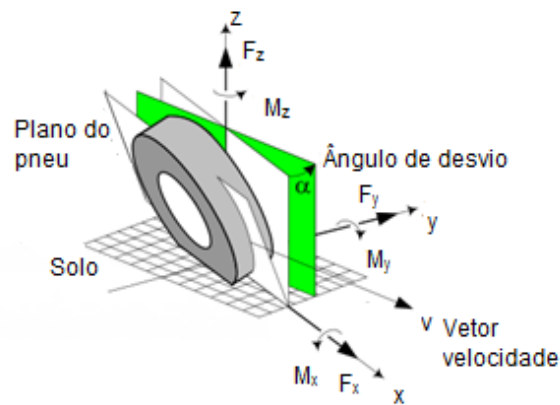


Figura 10 – Ângulo α de desvio do pneu (2)

$$C_{\alpha} = \left(\frac{dF_y}{d\alpha} \right)_{\alpha=0} \quad (2.57)$$

A interpretação gráfica do *cornering stiffness* está representada na figura 11.

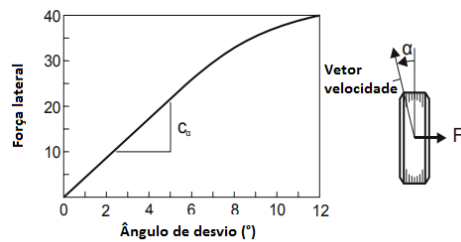


Figura 11 – Interpretação gráfica do *cornering stiffness* (3)

O *cornering stiffness* é calculado em $N/^\circ$, e depende de diversas variáveis, dentre as quais se destacam a carga vertical sobre o pneu, as dimensões pneu, o seu tipo (radial ou diagonal) e a pressão de enchimento. As figuras 12, 13 e 14 ilustram a influência dessas variáveis.

Devido à dependência da força lateral com a carga vertical, F_z , define-se o *cornering coefficient* CC_{α} como:

$$C_{\alpha} = CC_{\alpha} \cdot F_z \quad (2.58)$$

O *cornering coefficient* é calculado em $N_Y/(N_Z \cdot ^\circ)$, onde N_Z significa a força vertical no pneu e N_Y a sua força lateral.

O *cornering coefficient* possui seu maior valor com baixa carga vertical, diminuindo à medida que se aumenta a carga. A figura 15 ilustra esta situação.

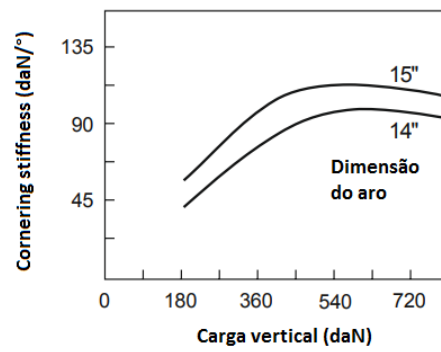


Figura 12 – *cornering stiffness* em função da carga (3)

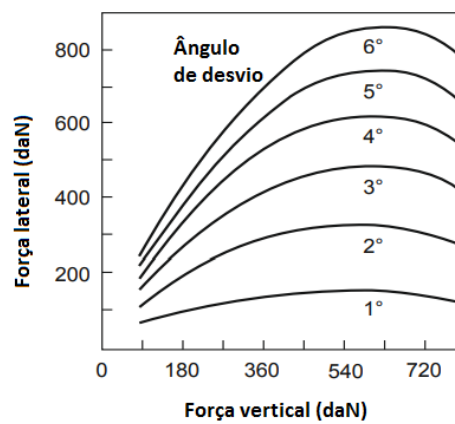


Figura 13 – Força lateral em função da força vertical (3)

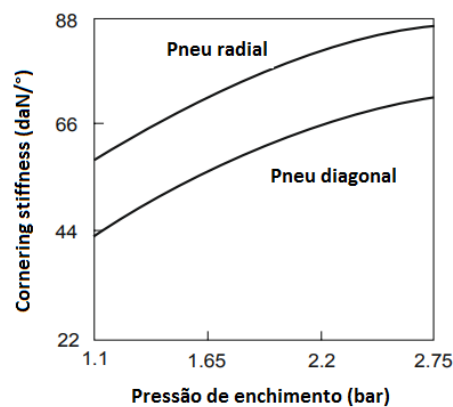


Figura 14 – *cornering stiffness* em função da pressão (3)

c) Forças da suspensão e princípio de D'Alembert

Assume-se que a força de suspensão tem a mesma direção que a coluna telescópica. A mola e o amortecedor são considerados coaxiais.

Para o estudo da dinâmica, é necessário definir o tensor de inércia do sistema.

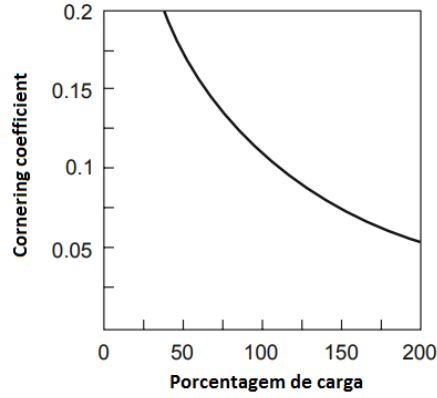


Figura 15 – *cornering coefficient* em função da porcentagem de carga (3)

Considera-se que as origens dos referenciais dos corpos de interesse estão localizados em seus centros de massa e que seus eixos coincidem com os eixos principais dos corpos, fazendo com que o tensor de inércia de cada corpo, em relação ao seu referencial local, seja uma matriz diagonal de dimensão 6x6. Dessa forma, o tensor de inércia de cada corpo i , de massa m_i e momentos de inércia I_{xx} , I_{yy} e I_{zz} , é dado por:

$$\Xi_i = \begin{bmatrix} m_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_i \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

O estudo dinâmico é feito usando o princípio de D'Alembert:

$$\mathbf{M}(\underline{q}) \cdot \ddot{\underline{q}} + \mathbf{B}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) = \mathbf{Q}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) \quad (2.60)$$

onde \mathbf{M} é a matriz de inércia do sistema, \mathbf{B} é o vetor de forças giroscópicas e \mathbf{Q} é o vetor de forças aplicadas, e são calculadas por:

$$\mathbf{M}(\underline{q}) = \mathbf{J}_G^T \cdot \Xi \cdot \mathbf{J}_G \quad (2.61)$$

$$\mathbf{B}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) = \mathbf{J}_G^T \cdot (\Xi \cdot \dot{\mathbf{J}}_G + \underline{b}) \quad (2.62)$$

$$\mathbf{Q}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) = \mathbf{J}_G^T \cdot \underline{w}_e \quad (2.63)$$

Onde Ξ é o tensor de inércia do sistema

2.4.8 Esterçamento de veículo com três eixos

O modelo de um veículo de três eixos com esterçamento em dois deles está representado na figura 16, onde C é o centro de gravidade do veículo.

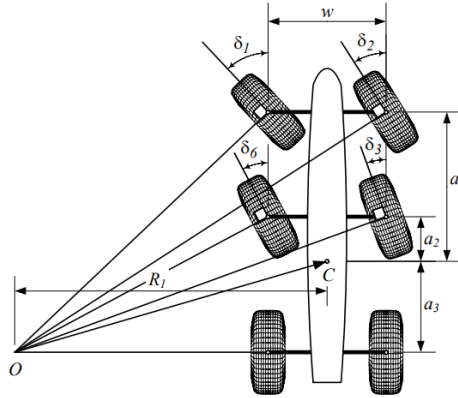


Figura 16 – Esterçamento de um veículo de três eixos (2)

Utilizando a geometria de Ackerman (2), observa-se que há duas condições independentes para as rodas de um mesmo eixo:

$$\cot(\delta_2) - \cot(\delta_1) = \frac{w}{a_1 + a_2} \quad (2.64)$$

$$\cot(\delta_3) - \cot(\delta_6) = \frac{w}{a_2 + a_3} \quad (2.65)$$

Para as rodas esterçantes de eixos diferentes, tem-se as seguintes condições:

$$\frac{\operatorname{tg}\delta_6}{\operatorname{tg}\delta_1} = \frac{a_2 + a_3}{a_1 + a_3} \quad (2.66)$$

$$\frac{\operatorname{tg}\delta_3}{\operatorname{tg}\delta_2} = \frac{a_2 + a_3}{a_1 + a_3} \quad (2.67)$$

A figura 17 apresenta a relação entre o ângulo de esterçamento da roda interna δ_i e da roda externa δ_o de um mesmo eixo de acordo com a geometria de Ackerman. Observa-se que, à medida que a razão $\frac{w}{l}$ decresce, mais o valor de δ_o se aproxima do valor de δ_i .

A geometria de Ackerman é necessária para baixas velocidades e ângulo de desvio nulo. É possível desenvolver um sistema de direção que obedeça a esta geometria para determinados ângulos, mas não para todos (2). Por este motivo, analisa-se a eficiência de um sistema de direção pela sua proximidade com a geometria de Ackerman.

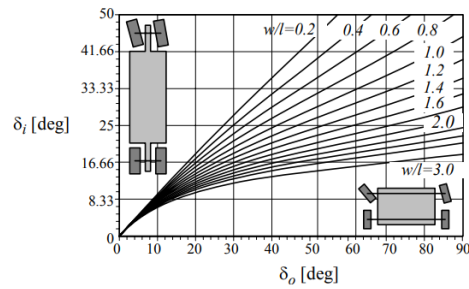


Figura 17 – Relação entre δ_i e δ_o de um mesmo eixo (2)

2.5 Testes de campo

Os testes de campo foram realizados na VBTP-MR 6x6 Guarani, do Exército Brasileiro, na configuração sem torre. O perfil da viatura está representado na figura 18, e a sua suspensão, do tipo MacPherson nas seis rodas, está apresentada na figura 19.



Figura 18 – Vista em perspectiva da VBTP-MR Guarani (4)



Figura 19 – Suspensão MacPherson dianteira direita da VBTP-MR Guarani

As medidas da suspensão foram tomadas considerando os pontos apresentados nas figuras 20, 21 e 22.

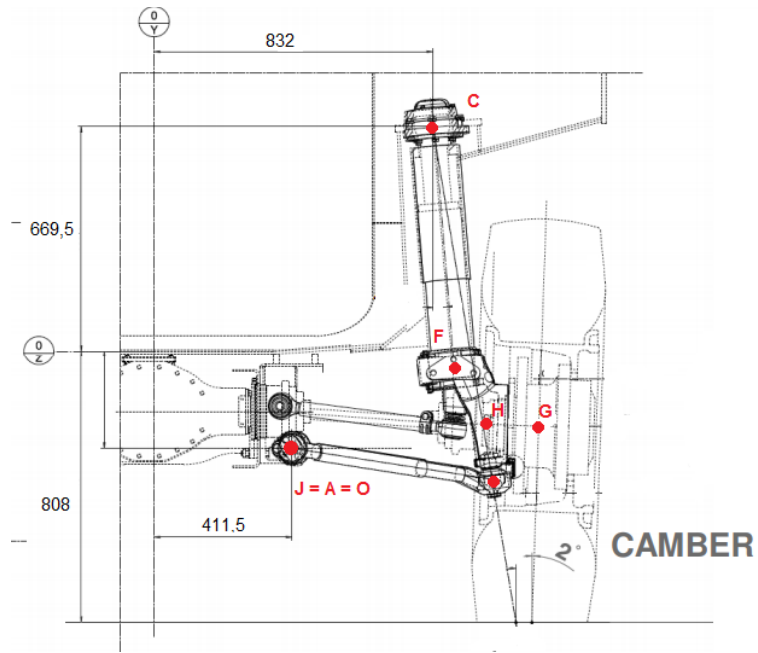


Figura 20 – Suspensão da VBTP-MR Guarani, medidas em mm (5)

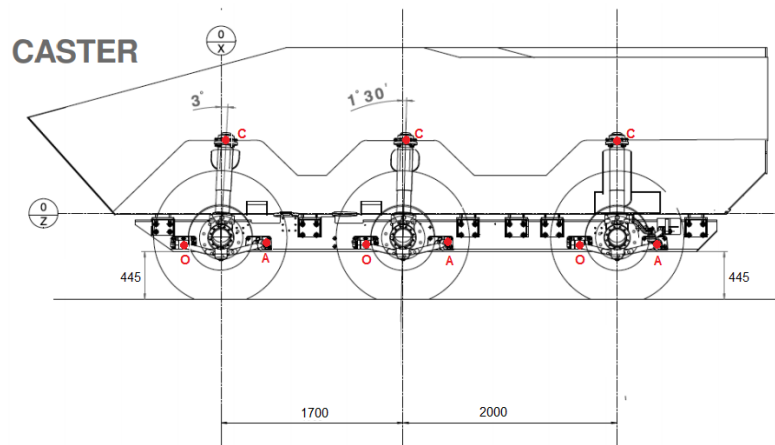


Figura 21 – Suspensão da VBTP-MR Guarani, medidas em mm (5)

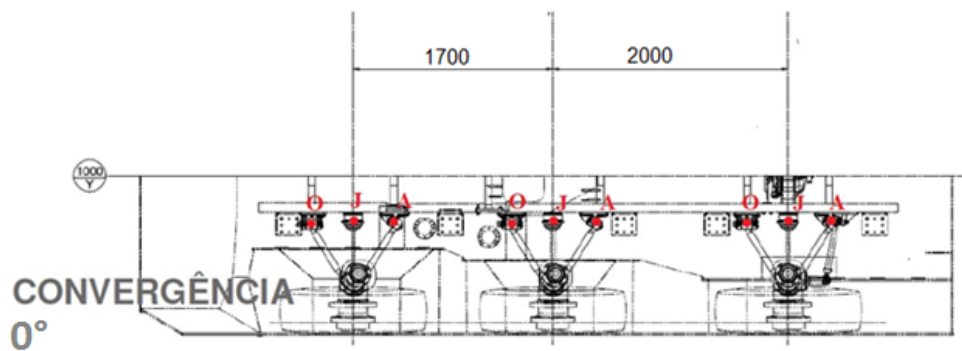


Figura 22 – Suspensão da VBTP-MR Guarani, medidas em mm (5)

Os testes foram realizados com a viatura na condição vazia, na velocidade de 28 km/h. Esta velocidade foi considerada, além de motivos de segurança, com a finalidade de reduzir o ângulo de desvio do pneu, que aumenta com o aumento da velocidade. Dessa forma, com baixos ângulos de desvio, é possível aproximar as forças laterais do pneu como uma função linear do ângulo de desvio. Mantendo esta velocidade, o veículo é conduzido ao longo de uma pista de teste onde executa uma manobra evasiva dupla.

Nesta manobra o veículo, em trajetória retilínea, realiza uma curva para a esquerda, acertando em seguida a direção de movimento paralelamente à direção inicial. Em seguida, é feita uma curva para a direita de forma a voltar para a mesma reta do movimento inicial. A vista superior da pista está ilustrada na figura 23.

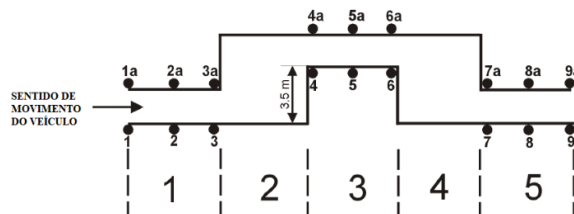


Figura 23 – Vista superior de uma manobra evasiva dupla (6)

As taxas de variação dos ângulos *pitch*, *roll* e *yaw* do veículo foram medidas utilizando uma Inertial Measurement Unit (Unidade de Medida Inercial) – IMU da Racelogic, modelo RLVBIMU04. A IMU foi fixada no chão do chamado vão da tropa, de maneira a ficar aproximadamente no centro de gravidade da viatura. O sensor foi conectado ao data logger VBOX 3i da Racelogic, unidade que centraliza os dados. Essa unidade foi conectada via USB a um notebook que utiliza o software VBOX Tools, também da Racelogic. Também foi conectado ao VBOX 3i sua antena GPS, utilizada na aquisição dos dados de distância percorrida e velocidade durante o teste. Este esquema de montagem está apresentado na figura 24.

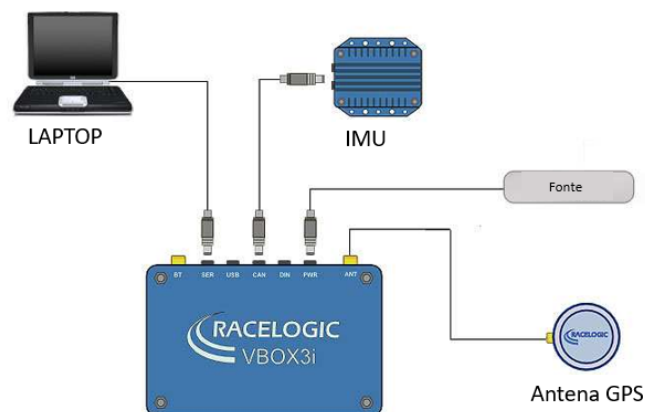


Figura 24 – Esquema de montagem dos equipamentos de medição

3 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

O modelo implementado neste trabalho consiste em um veículo com suspensões MacPherson nas seis rodas e sistema de direção com esterçamento em dois dos três eixos. Utilizando o método dos transformadores cinemáticos, é possível considerar as não linearidades provenientes da geometria da suspensão.

O modelo computacional foi desenvolvido em ambiente MATLAB®. O método de integração empregado para a solução das equações diferenciais da dinâmica do veículo é o Método de Gear, que no MATLAB® corresponde à função ode15s. O método de Gear é um método adequado para resolver sistemas rígidos de equações diferenciais (*stiff differential equations*). Equações diferenciais são ditas rígidas quando sua solução possui um termo na forma e^{-kt} , onde k é um número positivo e t é o tempo. Este termo é encontrado quando se estuda vibrações amortecidas, como é o caso das vibrações veiculares. O termo e^{-kt} decai rapidamente para zero quando t aumenta, caracterizando a parte transiente da solução.

Os parâmetros da viatura, apresentados das tabelas 3 a 7, foram tomados da VBTP-MR Guarani. A viatura Guarani é considerada na condição vazia, isto é, sem lastro.

Tabela 3 – Parâmetros da suspensão

Elemento	Medida (mm)	Elemento	Medida (mm)
AO	730,0	FB	390,0
JB	740,0	FD	340,0
JC	1052,9	HB	200,0
CL	1266,0	HG	155,0
DE	800,0	Comp. da col.telescópica	1150,0

Tabela 4 – Massa e momento de inércia do chassi

$M_c(kg)$	$I_{xx}(kg.m^2)$	$I_{yy}(kg.m^2)$	$I_{zz}(kg.m^2)$
12588,0	11914,5	52729,5	63595,4

Tabela 5 – Massa e momento de inércia dos corpos da suspensão

Corpo	m (kg)	$I_{xx}(kg.m^2)$	$I_{yy}(kg.m^2)$	$I_{zz}(kg.m^2)$
3	50,0	1,0	2,0	2,0
7	190,0	19,1	19,1	33,8

Tabela 6 – Ângulos da ponteira de direção

Ângulo	Valor (°)	Ângulo	Valor (°)
ρ_1	3,0	ρ_2	344,8

Tabela 7 – Posição do ponto J de cada suspensão em relação ao CG do chassi

Suspensão	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
DD	1926,7	-411,5	-744,5
DE	1926,7	411,5	-744,5
ID	26,7	-411,5	-744,5
IE	26,7	411,5	-744,5
TD	-1732,5	-411,5	-744,5
TE	-1732,5	411,5	-744,5

O pneu utilizado pela VBTP-Guarani é do tipo 14R20 off-road, marca XZL Michelin 164G ou PS22 Pirelli 164/160G (4). Não foram encontrados os valores de *cornering stiffness* deste pneu, por este motivo foram utilizados na simulação outros pneus off-road, empregados em caminhões ou veículos militares e de aros levemente superiores:

- 1) Pneu Michelin 16.00R20 XZL;
- 2) Pneu Michelin 315/70 R22.5 XZE2+154/150L;
- 3) Pneu Michelin 11.00R22.5 XZE2+ 148/145L.

A tabela 8 apresenta os valores de *cornering stiffness* C_α , carga e fonte de onde foram retirados os seus dados. É atribuída uma numeração para cada pneu para facilitar a sua referência nas simulações.

Tabela 8 – Dados dos pneus utilizados nas simulações

Número	Pneu	C_α	Carga (kg)	Fonte
1	Michelin 16.00R20 XZL	5600	3905	(13)
2	Michelin 315/70 R22.5 XZE2+154/150L	3000	2000	(12)
3	Michelin 11.00R22.5 XZE2+ 148/145L	2200	2000	(12)

Convém ressaltar que Domprobst (12) apresenta curvas não lineares de variação do *cornering stiffness* em função da carga vertical. No entanto, neste trabalho foi assumido que a força lateral de cada pneu F_y é calculada em função do *cornering stiffness* tabelado $C_{\alpha,tab}$, da força vertical tabelada $F_{z,tab}$, da força vertical F_z e do ângulo de desvio α por:

$$F_y = C_\alpha \cdot \alpha = \frac{C_{\alpha,tab}}{F_{z,tab}} \cdot F_z \cdot \alpha = CC \cdot F_z \cdot \alpha \quad (3.1)$$

O *cornering coefficient* CC de cada um dos pneus 1, 2 e 3 são dados respectivamente por:

$$CC_1 = \frac{5600}{3905 \cdot 9,8} = 0,14 \frac{N_y}{N_z \cdot \circ} \quad (3.2)$$

$$CC_2 = \frac{3000}{2000 \cdot 9,8} = 0,15 \frac{N_y}{N_z \cdot \circ} \quad (3.3)$$

$$CC_3 = \frac{2200}{2000.9,8} = 0,11 \frac{N_y}{N_z.^\circ} \quad (3.4)$$

O sistema de direção desenvolvido no modelo é do tipo pinhão-cremalheira. A sua entrada é o ângulo de esterçamento no volante, q_{vol} , medido em graus. Foi estabelecida uma relação linear entre q_{vol} e o comprimento da cremalheira da suspensão dianteira direita (β_9) e dianteira esquerda (β_{19}), isto é, a nona coordenada relativa de cada transformador cinemático. As funções são dadas por:

$$\beta_9 = 0,3178 + 0,001.q_{vol} \quad (3.5)$$

$$\beta_9 = 0,3178 - 0,001.q_{vol} \quad (3.6)$$

Onde o comprimento da cremalheira é dado por $2.0,3178 = 0,6356$ m.

As coordenadas de junta referentes ao comprimento da cremalheira intermediária (β_{29} e β_{39}) são obtidas de forma semelhante às coordenadas do eixo dianteiro, porém com uma razão de deslocamento linear de cremalheira q'_{vol} igual a 40% do deslocamento linear da cremalheira dianteira, de forma a aproximar o sistema de direção desenvolvido à geometria de Ackerman.

Empregando a condições de Ackerman para as rodas de um mesmo eixo, expressos nas equações 2.64 e 2.65, calcula-se:

$$\frac{w}{a_1 + a_3} = \frac{2.0,4115}{3,7} = \frac{0,823}{3,7} \approx 0,22 \quad (3.7)$$

$$\frac{w}{a_2 + a_3} = \frac{2.0,4115}{2,0} = \frac{0,823}{2,0} \approx 0,41 \quad (3.8)$$

As figuras 25 e 26 representam a razão de esterçamento entre as rodas internas e externas da curva nos eixos dianteiro e intermediário, respectivamente. Os resultados são comparados com o mecanismo de Ackerman, isto é, o mecanismo que obedece à condição de Ackerman, conforme equações 2.64 e 2.65.

Para a obtenção desses gráficos, o ângulo de esterçamento da roda externa, δ_{ext} , varia de 0° a 10° , para o eixo dianteiro, e varia de 0° a 5° para o eixo intermediário. Estes intervalos foram adotados já que, nos ensaios propostos neste trabalho, o esterçamento não ultrapassa estes valores.

Para representar as curvas de Ackerman das figuras 25 e 26, utilizou-se as relações de Ackerman nas equações 2.64 e 2.65, assim como os parâmetros do veículo nas equações

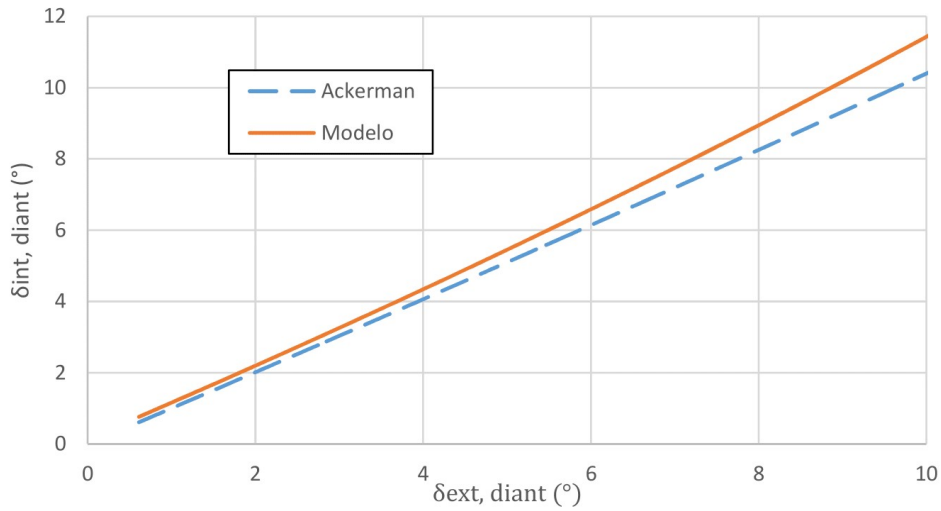


Figura 25 – Mecanismo de direção das rodas diante. e o mecanismo de Ackerman.

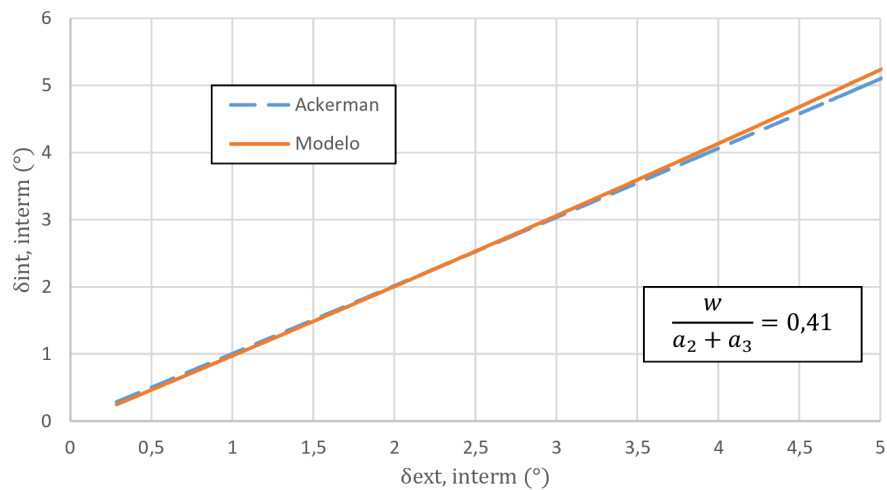


Figura 26 – Mecanismo de direção das rodas interm. e o mecanismo de Ackerman.

3.7 e 3.8, obtendo-se uma relação entre o esterçamento da roda interna e externa para os eixos dianteiro e intermediário, representados, respectivamente, nas equações 3.9 e 3.10:

$$\delta_{int,diant} = \cot^{-1}(\cot\delta_{ext,diant} - 0,22) \quad (3.9)$$

$$\delta_{int,diant} = \cot^{-1}(\cot\delta_{ext,diant} - 0,41) \quad (3.10)$$

Nota-se que o gráfico do mecanismo de Ackerman é aproximadamente linear nas figuras 25 e 26, em virtude da baixa razão $\frac{w}{a_1+a_3}$ e $\frac{w}{a_2+a_3}$. Quanto maior esta razão, menos linear é o seu gráfico, conforme Jazar (2).

Verifica-se que ambos os mecanismos de direção são próximos do mecanismo de

Ackerman para pequenos ângulos, se distanciando com o aumento do ângulo de esterçamento. No entanto, nas simulações consideradas neste trabalho, o ângulo de esterçamento das rodas dianteiras não ultrapassam 10° para estas rodas, de forma que o distanciamento da condição de Ackerman não ultrapassa 1° . Em virtude do mecanismo de direção desenvolvido ser simétrico, os resultados das figuras 25 e 26 não alteram quando a curva é para a direita ou para a esquerda. Por fim, vale destacar nas figuras 25 e 26 que o ângulo das rodas do eixo dianteiro é maior que o das rodas do eixo intermediário.

Empregando a condições de Ackerman para as rodas de eixos diferentes, expressos nas equações 2.66 e 2.67, calcula-se:

$$\frac{a_2 + a_3}{a_1 + a_3} = \frac{2}{3,7} \approx 0,54 \quad (3.11)$$

As figuras 27 e 28 representam o comportamento do mecanismo de direção das rodas externas e internas à curva, respectivamente, em comparação com o mecanismo de Ackerman. Para a obtenção desses gráficos, as rodas do eixo intermediário esterçaram um ângulo até 5° , analisando o esterçamento da roda do eixo intermediário δ_{interm} e do eixo dianteiro δ_{diant} .

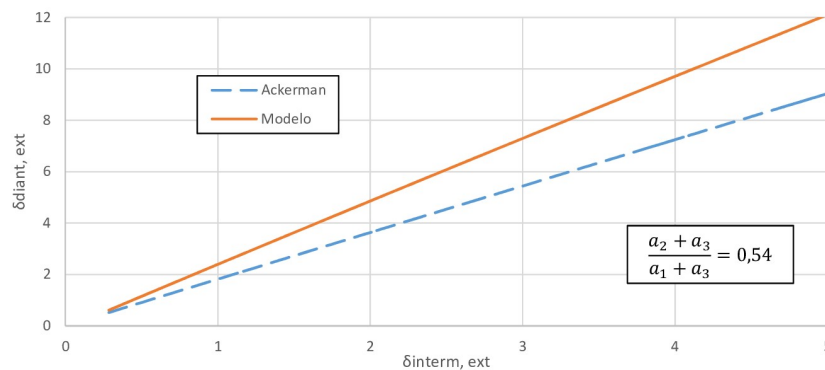


Figura 27 – Mec. de direção das rodas ext. à curva e o mecanismo de Ackerman.

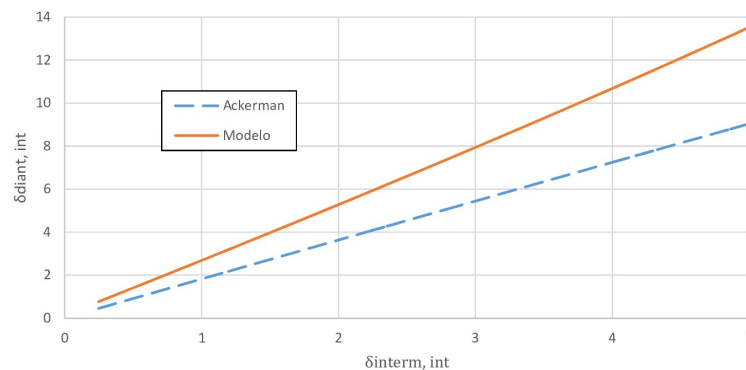


Figura 28 – Mec. de direção das rodas int. à curva e o mecanismo de Ackerman.

Vale notar que, assim como nas figuras 25 e 26, o distanciamento do mecanismo de Ackerman aumenta à medida que se aumenta o ângulo de esterçamento do volante. Além disso, as rodas externas à curva apresentam menor distanciamento do mecanismo de Ackerman em comparação com as rodas internas à curva. Vale, no entanto, ressaltar que, nas simulações deste trabalho, o ângulo das rodas dianteiras não ultrapassa 11° , portanto o mecanismo de direção não difere em mais que 4° do mecanismo de Ackerman.

Para representar as curvas de Ackerman das figuras 27 e 28, utilizou-se as relações de Ackerman em 2.66 e 2.67, assim como o parâmetro do veículo 3.11, obtendo-se uma relação entre o esterçamento da roda interna e externa para os eixos dianteiro e intermediário, representados, respectivamente, nas equações 3.12 e 3.13:

$$\delta_{diant,ext} = tg^{-1} \left(\frac{tg(\delta_{interm,ext})}{0,54} \right) \quad (3.12)$$

$$\delta_{diant,int} = tg^{-1} \left(\frac{tg(\delta_{interm,int})}{0,54} \right) \quad (3.13)$$

A figura 29 apresenta o ângulo de esterçamento de cada roda em função do esterçamento do volante. Para a obtenção do gráfico, o volante foi girado do esterçamento nulo até um ângulo de 160° no sentido anti-horário.

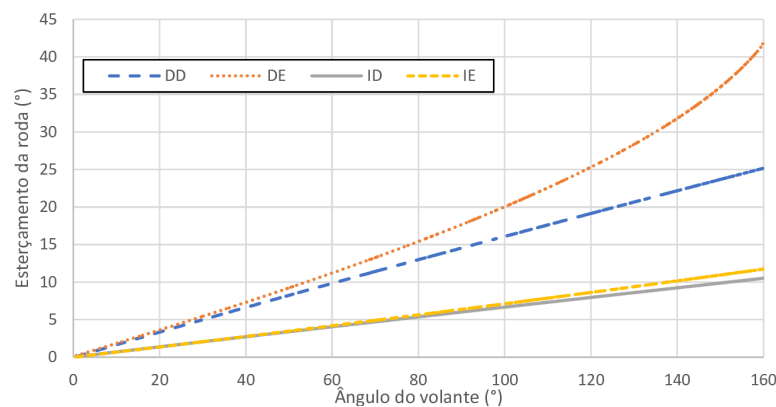


Figura 29 – Âng de esterçamento das rodas em função do âng. do volante.

Vale ressaltar que o esterçamento do volante nos ensaios deste trabalho não ultrapassa 45° , no entanto, foi simulado um esterçamento de 160° para verificar como se comporta o esterçamento de cada roda em função do esterçamento no volante.

Vale notar que as rodas do eixo dianteiro esterçam mais que as do eixo intermediário. Além disso, em um esterçamento do volante no sentido horário (valores positivos de esterçamento do volante), as rodas do lado esquerdo esterçam mais que as rodas do ângulo direito, assim como um esterçamento no sentido anti-horário (negativo) as rodas do lado direito esterçam mais, estando, portanto, de acordo com a geometria de Ackerman.

De acordo com a figura 29, observa-se as seguintes relações de esterçamento do volante para o esterçamento da roda:

Tabela 9 – Relação entre o esterçamento do volante para o esterçamento da roda

Roda	Est. vol/est roda
DD	6,0
DE	5,3
ID	16,0
IE	16,0

A suspensão da VBTP Guarani possui atuadores hidropneumáticos que definem a rigidez e o amortecimento do sistema de acordo com as condições de abastecimento inicial de gás e massa suspensa suportada por cada suspensão nos três eixos (11). Devido à distribuição de massa suspensa ser desigual sobre os eixos, a carga inicial no ponto de equilíbrio de cada um dos atuadores é diferente.

Nas simulações do presente trabalho, são modeladas três condições diferentes para as forças de suspensão, isto é, forças elástica e de amortecimento. É atribuído um número para cada suspensão, para facilitar a sua referência nas simulações. Em todos os casos, a rigidez do pneu é igual a 1250 kN/m.

1) Suspensão 1 - rigidez constante e coeficiente de amortecimento diferente para as condições de compressão (*bump*) e extensão (*rebound*) (11);

2) Suspensão 2 - força elástica variável segundo uma soma de funções exponenciais (11) e coeficiente de amortecimento diferente para as condições de *bump* e *rebound*;

3) Suspensão 3 - força elástica variável segundo uma soma de funções exponenciais (10) e coeficiente de amortecimento diferente para as condições de *bump* e *rebound*.

Para o primeiro caso, as constantes de rigidez e de amortecimento são consideradas constantes e estão apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 – Rigidez e constante de amortecimento da suspensão

Corpo	Const. de rigidez, k (N/m)	Const. de amortecimento, c (N.s/m)
Suspensão	193000,0 (diante. dir.)	10000,0 (<i>bump</i>) 27692,3 (<i>rebound</i>)
	202000,0 (diante. esq.)	
	223000,0 (interm. dir.)	
	235000,0 (interm. esq.)	
	267000,0 (tras.dir.)	
	283000,0 (tras. esq.)	

No segundo caso, as forças de suspensão são expressões exponenciais. Assim, a força das rodas dos eixos dianteiro F_{kd} , eixo intermediário F_{ki} e eixo traseiro F_{kt} são calculadas em função do deslocamento x , em mm, por:

$$F_{kd} = 2,388.10^4 .e^{0,00847x} + 50,58.e^{0,05956x} \quad (3.14)$$

$$F_{ki} = 2,416.10^4 .e^{0,008371x} + 67,33.e^{0,05772x} \quad (3.15)$$

$$F_{kt} = 2,391.10^4 .e^{0,008617x} + 57,39.e^{0,05881x} \quad (3.16)$$

O gráfico das forças de suspensão dianteira, intermediária e traseira em função do deslocamento x , em mm, estão representados nas figuras 30, 31 e 32, respectivamente. O amortecimento da suspensão é de 10000,00 N.S/m na condição de *bump* e 27692,31 N.s/m na condição de *rebound*.

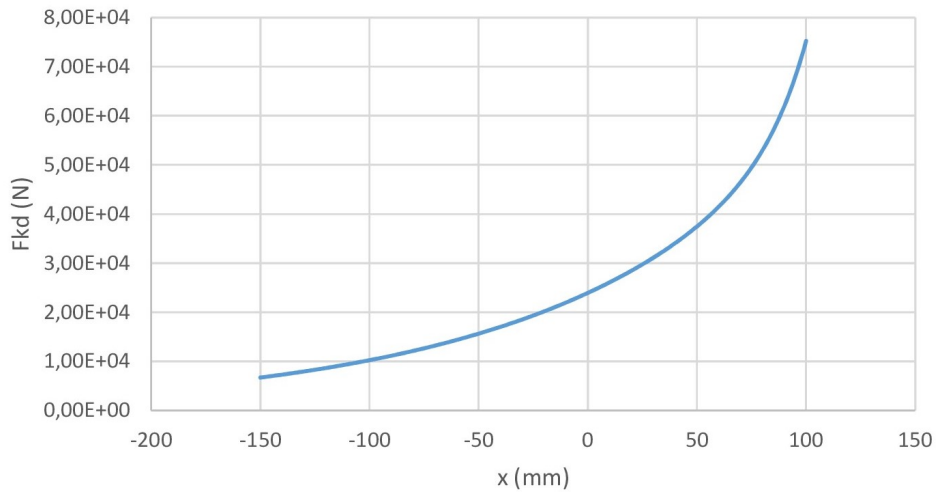


Figura 30 – Força de suspensão das rodas do eixo dianteiro (3° caso).

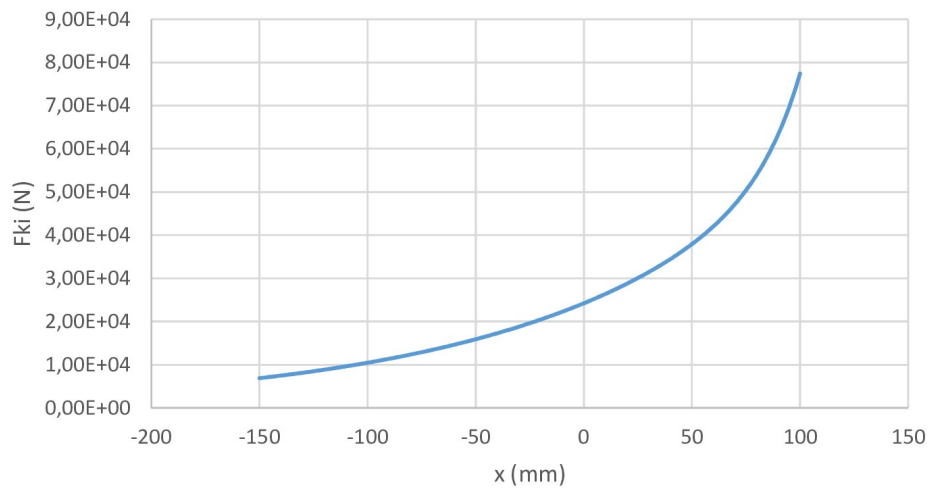


Figura 31 – Força de suspensão das rodas do eixo intermediário (3° caso).

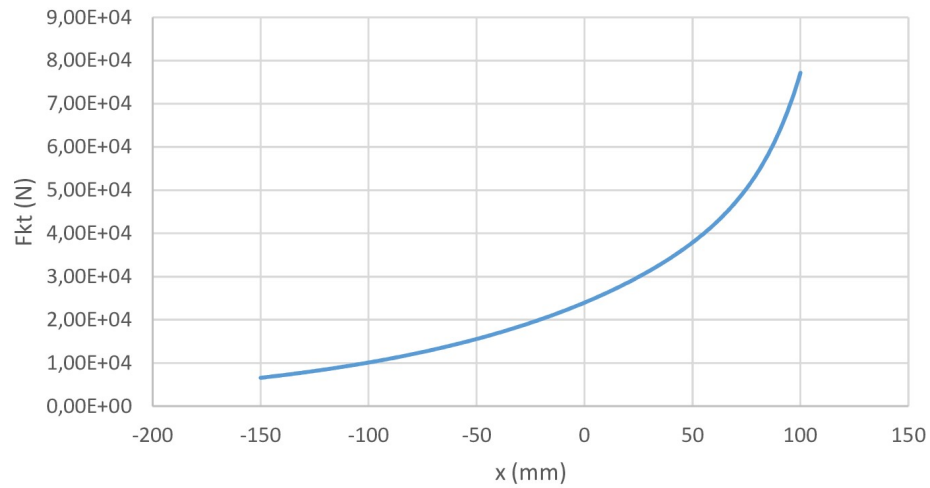


Figura 32 – Força de suspensão das rodas do eixo traseiro (3º caso).

No terceiro caso, as forças de suspensão são expressões exponenciais apresentadas por Campos (10), que estimou multiplicadores das curvas de rigidez da suspensão. Assim, a força das rodas dos eixos dianteiro F_{kd} , eixo intermediário F_{ki} e eixo traseiro F_{kt} são calculadas em função do deslocamento x , em mm, por:

$$F_{kd} = 9,9314.(2,388.10^4 .e^{0,00847x} + 50,58.e^{0,05956x}) \quad (3.17)$$

$$F_{ki} = 11,1196.(2,416.10^4 .e^{0,008371x} + 67,33.e^{0,05772x}) \quad (3.18)$$

$$F_{kt} = 4,5438.(2,391.10^4 .e^{0,008617x} + 57,39.e^{0,05881x}) \quad (3.19)$$

O gráfico das forças de suspensão dianteira, intermediária e traseira em função do deslocamento x , em mm, estão representados nas figuras 33, 34 e 35, respectivamente. O amortecimento da suspensão é de 5697,22 N.S/m na condição de *bump* e 9210,27 N.s/m na condição de *rebound*.

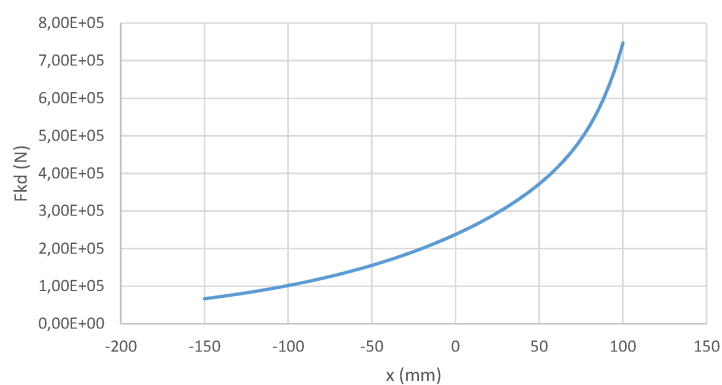


Figura 33 – Força de suspensão das rodas do eixo dianteiro (4º caso).

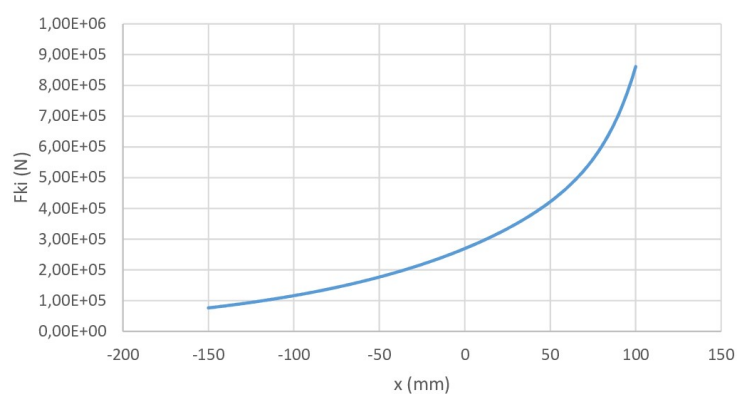


Figura 34 – Força de suspensão das rodas do eixo intermediário (4º caso).

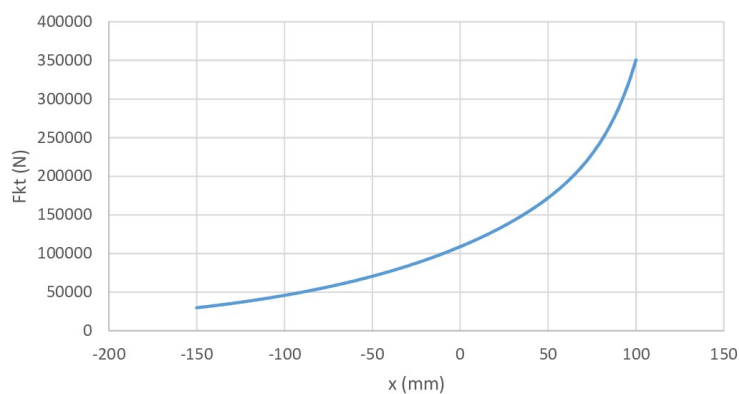


Figura 35 – Força de suspensão das rodas do eixo traseiro (4º caso).

4 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

4.1 Simulações propostas

O objetivo das simulações propostas é submeter o veículo a ensaios que permitam analisar a dinâmica veicular sob variadas condições de condução.

Os ensaios simulados são:

- 1) Veículo sujeito somente à ação do próprio peso;
- 2) Trajetória circular em regime permanente;
- 3) Manobra evasiva dupla.

Cada simulação tem um objetivo e dá ênfase a uma determinada característica do modelo.

Considera-se a influência da configuração da suspensão no equacionamento cinemático, que é uma fonte de não-linearidades. Para a solução destas equações, utiliza-se o método dos transformadores cinemáticos, de acordo com Costa Neto (1).

Os parâmetros do veículo foram tomados da Viatura Blindada de Transporte de Pessoal (VBTP) da Família Média Sobre Rodas 6x6 Guarani, do Exército Brasileiro. O modelo utiliza três formulações diferentes no cálculo das forças de suspensão, tomados de trabalhos anteriores sobre a VBTP Guarani, e três pneus com valores distintos de *cornering stiffness*, utilizados em veículos pesados ou de emprego militar.

Por último, os resultados obtidos a partir desse modelo são comparados com os resultados obtidos em testes de campo.

4.2 Veículo sujeito somente à ação do próprio peso

Nesta simulação, utilizam-se três formulações distintas para as forças de suspensão. Não são feitos testes com diferentes tipos de pneu, uma vez que esta modificação não causa mudanças nos resultados, senão na altura do centro de gravidade no equilíbrio, em virtude das dimensões diferentes de cada pneu. Nesta simulação, é utilizado o pneu 1 da TAB.3.6.

As condições iniciais da simulação estão apresentadas na TAB. 4.1. O veículo é abandonado de uma altura do CG do veículo ao solo de 1200 mm, posição próxima à posição de equilíbrio, com as molas da suspensão levemente comprimidas, sendo inicialmente submetido unicamente à ação do próprio peso e forças de suspensão. O veículo atinge a condição de equilíbrio estático vertical transcorridos 10 segundos da simulação, exceto

com a suspensão 3, que o atinge a 25 segundos. Assim, o veículo está pronto para realizar uma manobra.

Tabela 11 – Condições iniciais da simulação

Grau de liberdade	Pos. inicial	Vel. inicial
X_{CG}	0	0 km/h
Y_{CG}	0	0 km/h
Z_{CG}	0	0 km/h
$roll$	0 rad	0 rad/s
$pitch$	0 rad	0 rad/s
yaw	0 rad	0 rad/s
β_2	88,8°	0 rad/s

4.2.1 Suspensão 1

As figuras 36 a 45 mostram o comportamento do veículo até atingir o equilíbrio estático vertical com a suspensão 1.

A figura 36 apresenta a posição vertical do CG do veículo em relação ao solo, z_{CG} . Observa-se que o veículo foi liberado de uma altura de 1,21 m. Em seguida, observam-se oscilações amortecidas do centro de gravidade do chassi, acomodando a suspensão ao peso do veículo e atingindo, em seguida, o regime permanente. Convém ressaltar que o ângulo inicial dos braços inferiores de suspensão influencia nesta oscilação do centro de gravidade observada nos primeiros segundos. A altura de equilíbrio do centro de gravidade do chassi é de 1,25 m. Como a escala do eixo das ordenadas se encontra ampliada para melhor visualização, as oscilações apresentadas na figura 36 aparentam ser maiores, no entanto a oscilação não ultrapassa 6,0 cm. A pequena amplitude de oscilação ocorre pois o veículo foi abandonado de uma altura próxima à sua posição de equilíbrio.

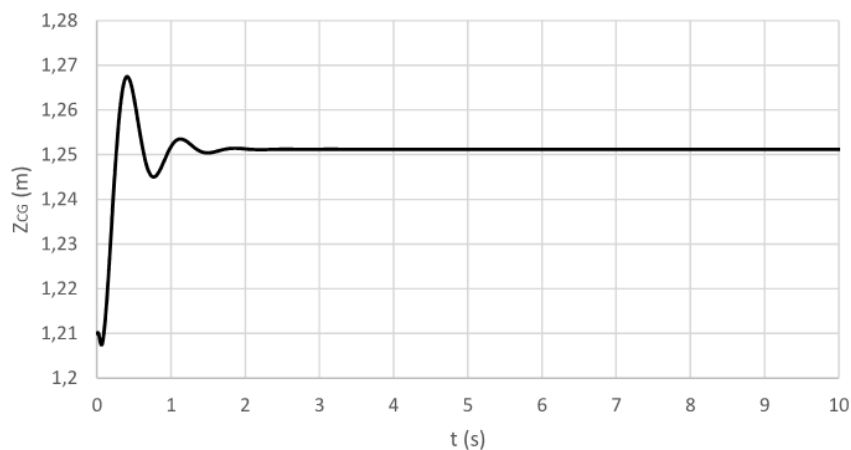


Figura 36 – Altura do CG em relação ao solo – sim. 1, suspensão 1

Foram realizados testes considerando valores maiores de compressão inicial das molas da suspensão (reduzindo o ângulo entre o braço inferior da suspensão e o chassi), e foi constatado que a amplitude de oscilação aumentava à medida que se aumentava a compressão. Foram também simuladas diferentes compressões entre as molas dos lados direito e o lado esquerdo, observando-se variações do ângulo de *roll* até atingir o equilíbrio, e diferentes compressões entre as molas dianteiras e traseiras, observando-se variações do ângulo de *pitch* até atingir o equilíbrio. Além disso, foram feitos testes aumentando-se a altura do centro de gravidade, constatando-se que a altura do CG decrescia até encontrar o solo e iniciar a oscilação.

A figura 37 apresenta o ângulo do braço inferior de cada suspensão com o chassi, β_1 . Inicialmente, todas as suspensões foram liberadas de um ângulo inicial de $88,8^\circ$, ângulo que faz com que as rodas não tenham contato com o solo considerando a altura do centro de gravidade do veículo de 1,21 m, mas permitem o contato imediatamente após o início da simulação, em $1 \cdot 10^{-2}$ s. Em seguida observam-se oscilações amortecidas dos braços de suspensão, de modo que, no equilíbrio, o ângulo de cada braço da suspensão com o chassi é, em ordem decrescente: $94,4^\circ$ (traseira esquerda), $94,0^\circ$ (intermediária esquerda), $93,9^\circ$ (traseira direita), $93,6^\circ$ (dianteira esquerda), $93,5^\circ$ (intermediária direita) e $93,2^\circ$ (dianteira direita).

Foram feitos testes considerando as rigidezes da suspensão de um mesmo eixo iguais, sendo observada a superposição dos gráficos dos braços de um mesmo eixo, em virtude da sua simetria no plano longitudinal. Além disso, foram feitos testes supondo todas as rigidezes iguais, e observou-se que os eixos que suportavam maior carga sofriam maior deformação, conseqüentemente o ângulo do braço da suspensão era menor. Conclui-se que o ângulo do braço da suspensão com o chassi depende da deformação de cada suspensão, que por sua vez depende da rigidez da suspensão e da carga suportada.

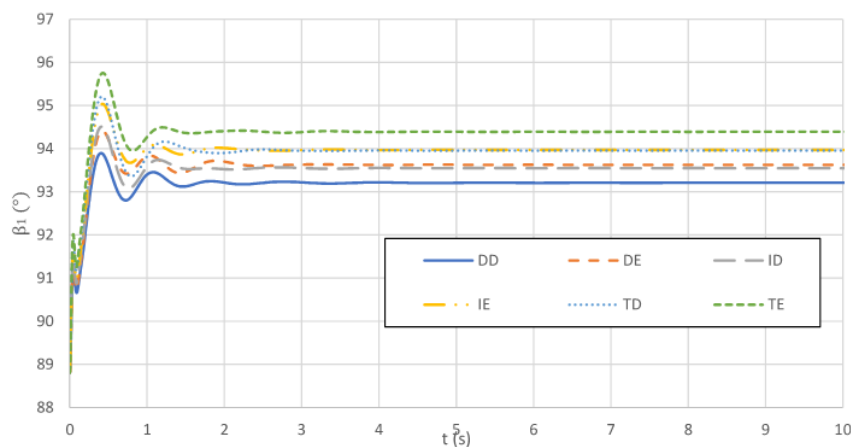


Figura 37 – Ângulo do braço inferior com o chassi – sim. 1, suspensão 1

A força vertical em cada roda, F_V , está representada na figura 38. Todas as rodas

iniciam com força vertical zero, por não terem contato com o solo. Em seguida, na condição de equilíbrio, a força é, em ordem decrescente, de: 25602,5 N (traseira esquerda), 25600,0 N (traseira direita), 22726,7 N (intermediária direita), 22699,0 N (intermediária esquerda), 20547,9 N (dianteira direita) e 20438,3 N (dianteira esquerda). Observa-se que os pesos suportados por rodas de um mesmo eixo são próximos. Observa-se também que maior parte da carga suportada pelo veículo é no eixo traseiro, seguido do eixo intermediário e do eixo dianteiro. Por este motivo, a rigidez das suspensões traseiras é mais elevada, permitindo que o veículo suporte maior carga em sua traseira e alinhando o veículo quando este se encontra carregado. Além disso, observa-se que a soma das forças verticais quando atingido o equilíbrio estático é igual ao peso do veículo completo (roda, suspensão e chassi).

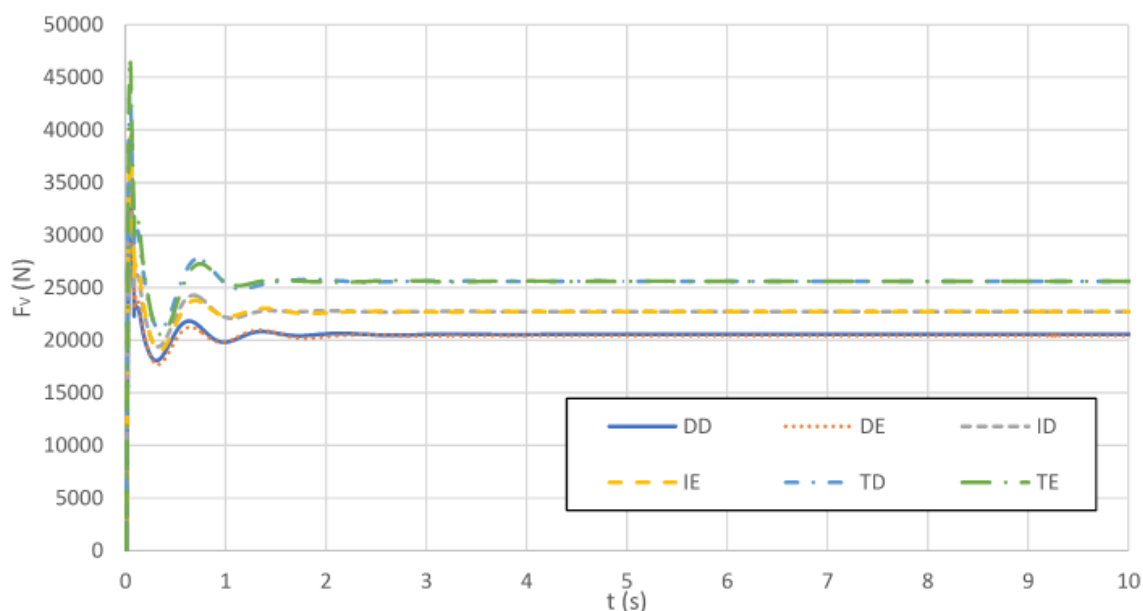


Figura 38 – Força vertical em cada roda – sim. 1, suspensão 1

O ângulo de câmbor de cada roda, γ , está representado na figura 39. Em termos de projeto, o ângulo de câmbor é predefinido, porém varia com a altura e o peso do veículo. Na condição de equilíbrio, esse ângulo é, em ordem decrescente, de: 2,4° (dianteira direita), 2,3° (dianteira esquerda), 2,3° (intermediária direita), 2,2° (intermediária esquerda), 2,1° (traseira direita) e 2,0° (traseira esquerda). O motivo da diferença de ângulo de câmbor de cada roda é que o maior peso suportado por uma roda faz com que o seu ângulo de câmbor seja maior. Somado a este fator, deve-se levar em consideração a geometria da suspensão, que difere de um eixo para outro devido ao ângulo de cáster.

O valor do ângulo de cáster é predefinido e não é passível de regulagem. Não varia mesmo com a diferença de altura do veículo ou com o seu peso. O ângulo de cáster da VBTP Guarani é: 3° (eixo dianteiro), 1,5° (eixo intermediário) e 0° (eixo traseiro), de acordo com Godoy (5).

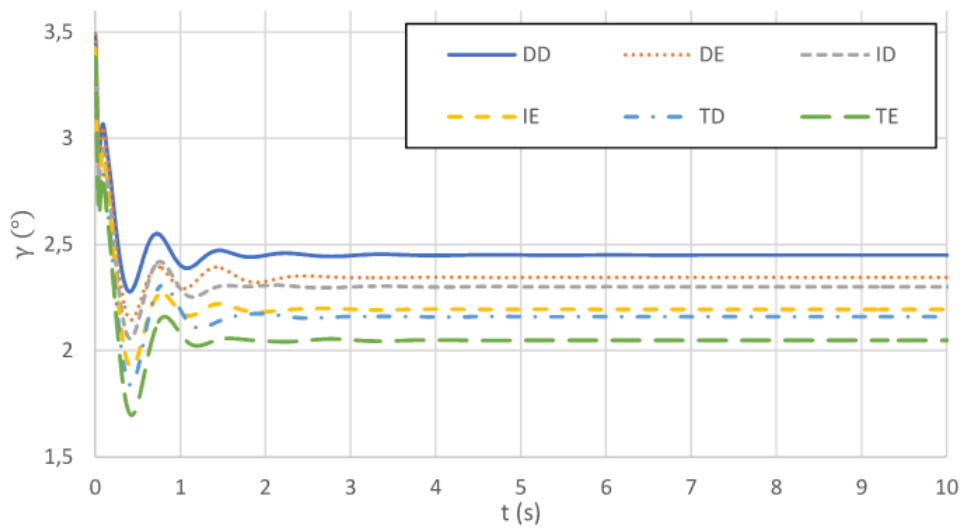


Figura 39 – Ângulo de câmbio das rodas – sim. 1, suspensão 1

O ângulo de convergência de cada eixo, ϵ , está representado na figura 40. O ângulo de convergência pode ser regulado por meio de seus tirantes e varia de acordo com a altura do veículo e o peso suportado. Quanto maior o peso suportado, menor o ângulo de convergência. Na condição de equilíbrio, o ângulo de convergência é, em ordem decrescente, de: $0,1^\circ$ (dianteira), $-0,3^\circ$ (intermediária), $-0,3^\circ$ (traseira). Estes valores são explicados pelo fato de, quanto maior o peso suportado, menor o ângulo.

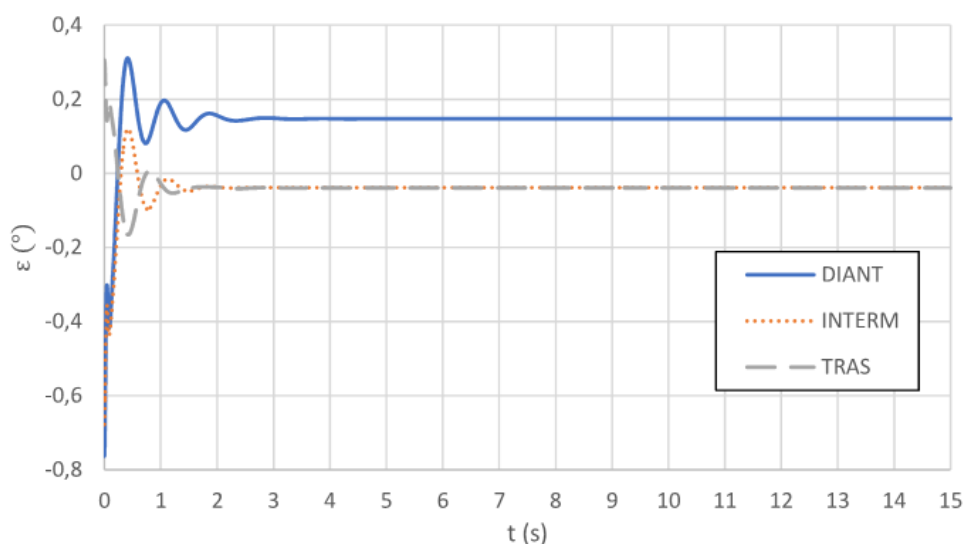


Figura 40 – Ângulo de convergência dos eixos – sim. 1, suspensão 1

Durante os primeiros segundos de simulação, constata-se uma variação no esterçamento da roda antes de atingir sua posição de equilíbrio. Vale ressaltar que o motorista não atua no volante para mudar a direção da roda, sendo o esterçamento causado pela

oscilação vertical da roda em relação ao veículo. Esse efeito é conhecido por *bump steer*, um fenômeno causado pelos mecanismos de suspensão e direção, de acordo com Jazar (2). Se um veículo possui o efeito de *bump steer*, então a sua roda esterça quando sofre um solavanco vertical ou quando há rolagem do chassi. Como consequência, o veículo percorre uma trajetória que diverge da prevista. Os links da internet (19) e (20) são gifs que representam o efeito de *bump steer*, e podem ser acessados para melhor esclarecimento deste efeito.

O *bump steer* é calculado pela razão entre o ângulo de esterçamento da roda e o seu deslocamento vertical. O esterçamento da roda aumenta à medida que o deslocamento vertical do veículo aumenta. Observando o gráfico da figura 41, considerando uma aproximação linear na condição de deslocamento vertical positivo, o *bump steer* do modelo desenvolvido é de aproximadamente $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ/\text{mm}$. Além disso, verifica-se que o esterçamento da roda é positivo (convergência positiva) à medida que a roda é comprimida ao solo, indicado pelo deslocamento vertical negativo.

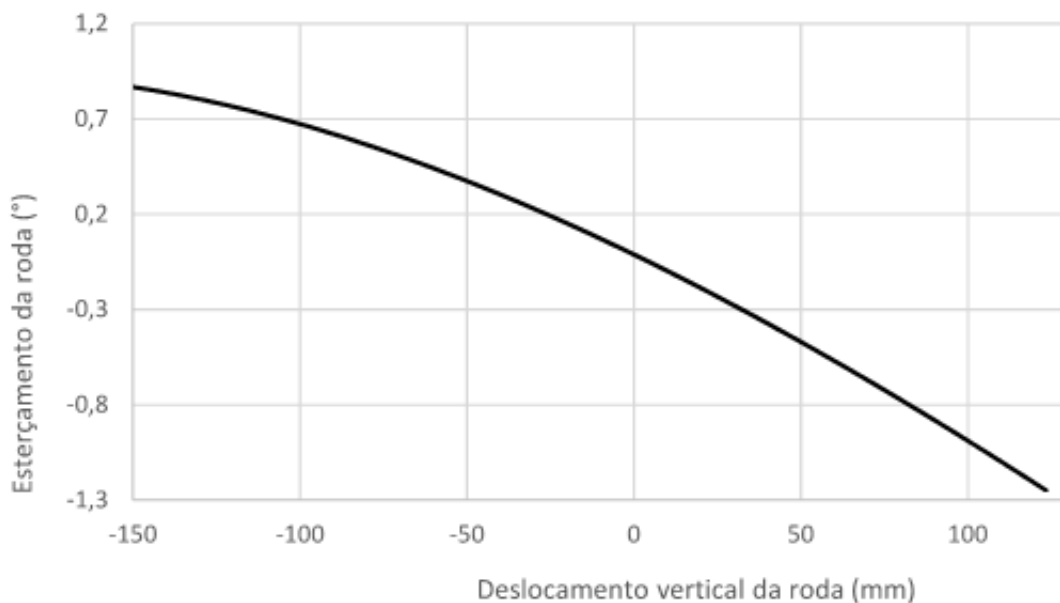


Figura 41 – Efeito de *bump steer* na roda dianteira direita

A figura 42 apresenta o deslocamento vertical da roda dianteira direita em função de seu ângulo de câmbor γ a partir da posição de equilíbrio. Para o mecanismo de suspensão modelado, a roda apresenta um aumento do ângulo de câmbor quando a roda se move para cima (deslocamento positivo). Vale notar que, na posição de equilíbrio ($h = 0$), o ângulo de câmbor é igual a $2,4^\circ$, valor de câmbor da roda dianteira direita na condição de equilíbrio estático, conforme a figura 39.

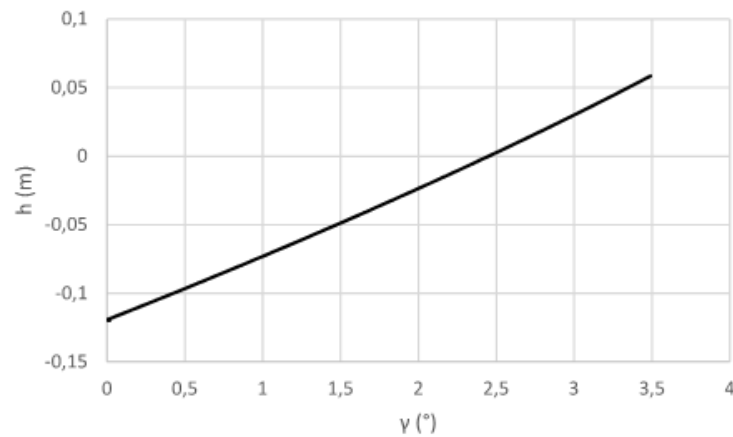


Figura 42 – Deslocamento vertical em função do âng. de câmbio da roda DD

As figuras 43, 44 e 45 apresentam os ângulos de *pitch*, *roll* e orientação do veículo, respectivamente. Na condição de equilíbrio, os ângulos de *pitch*, *roll* e orientação são, respectivamente: $9,8 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ$, $1,3 \cdot 10^{-1} \text{ }^\circ$ e $-7,7 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ$.

Na figura 43, o ângulo de *pitch* levemente positivo indica que a traseira do veículo está levemente acima da dianteira (referencial ISO 4130 (21)). Isso está de acordo com o fato dos braços da suspensão traseira apresentarem maior ângulo do que os braços da suspensão dianteira, levantando a traseira do veículo.

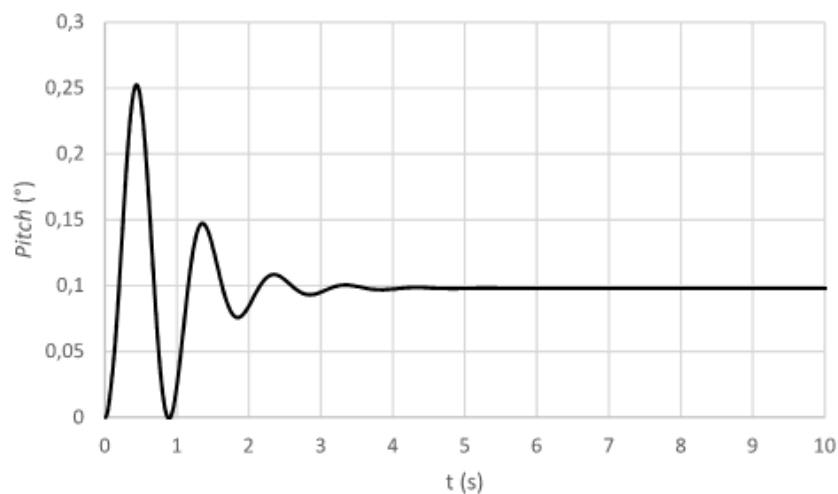
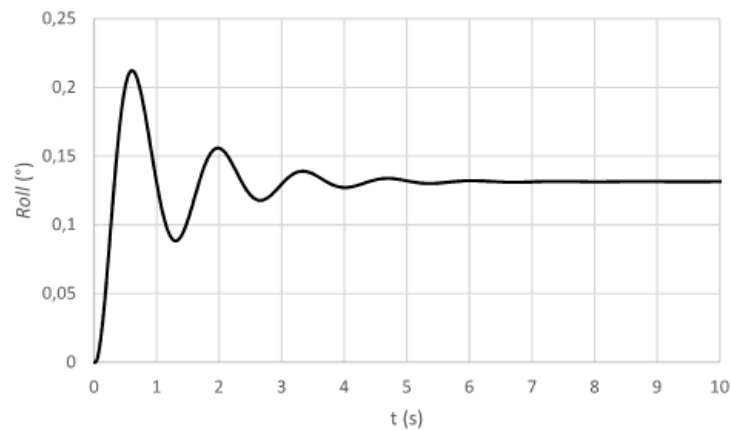


Figura 43 – Ângulo de *pitch* do veículo – sim. 1, suspensão 1

Na figura 44, o ângulo de *roll* levemente positivo indica que o veículo está levemente inclinado para a direita (referencial ISO 4130 (21)). Isso também está de acordo com o fato dos braços da suspensão esquerda apresentarem maior ângulo que os braços da suspensão direita, fazendo com que o veículo esteja levemente inclinado para a direita.

Figura 44 – Ângulo de *roll* do veículo – sim. 1, suspensão 1

Na figura 45, o ângulo de orientação levemente negativo indica que a direção longitudinal do veículo está levemente inclinada para a direita. No cálculo do ângulo de orientação, foram inicialmente realizados testes considerando a mesma rigidez nas rodas do mesmo eixo e ângulo do volante da direção nulo, hipótese considerada nos trabalhos de Costa Neto (1), Neves (6) e Chagas (8). Foi observado que o ângulo de orientação estabilizava em um valor próximo de zero. No entanto, quando foram consideradas rigidezes diferentes em um mesmo eixo, conforme 10, o veículo teria ângulo de orientação crescente para o esterçamento do volante nulo, desviando a trajetória para a esquerda. Para contornar este comportamento, foi necessário considerar um esterçamento inicial não nulo do volante, de forma a estabilizar o ângulo de orientação em um valor constante. De acordo com a figura 45, o ângulo de orientação estabiliza em $-7,7 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ$, ocorrendo isso para um esterçamento de $-0,2^\circ$ no volante. Valores de esterçamento do volante diferentes ocasionam ângulo de orientação crescente ou decrescente, não estabilizando o ângulo de orientação.

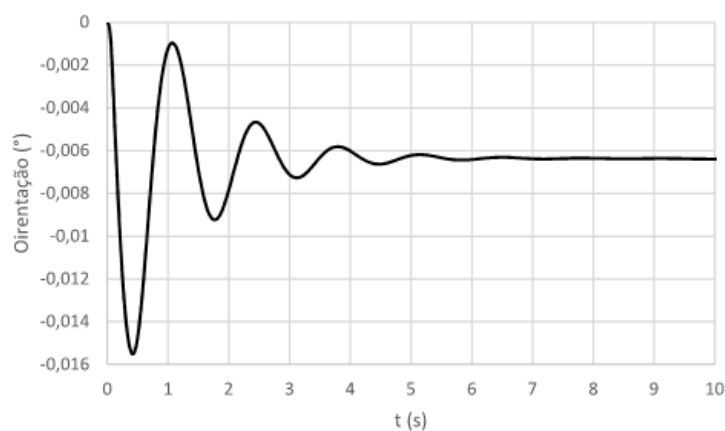


Figura 45 – Ângulo de orientação do veículo – sim. 1, suspensão 1

4.2.2 Suspensão 2

As figuras 46 a 53 mostram o comportamento do veículo até atingir o equilíbrio estático vertical com a suspensão 2.

Na figura 46, observa-se que o veículo foi liberado de uma altura de 1,36 m, sem contato com o solo e próximo de sua posição de equilíbrio, seguindo oscilações amortecidas do centro de gravidade do chassi até atingir o regime permanente. A altura de equilíbrio do centro de gravidade do chassi é de 1,35 m, maior que a altura da suspensão 1, uma vez que a nova configuração de suspensão ocasiona uma maior distensão da suspensão na condição de equilíbrio.

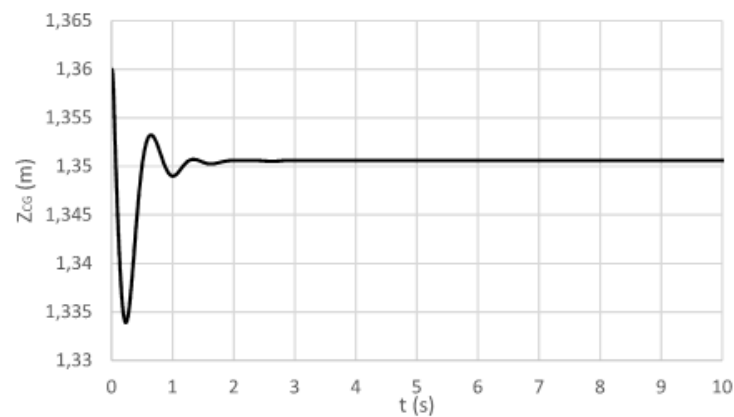


Figura 46 – Altura do CG em relação ao solo – sim. 1, suspensão 2

A figura 47 apresenta o ângulo do braço inferior de cada suspensão com o chassi, β_1 . todas as suspensões foram liberadas de um ângulo inicial de $100,3^\circ$, próximo à posição de equilíbrio, observando-se oscilações amortecidas dos braços de suspensão, de modo que, no equilíbrio, o ângulo de cada braço da suspensão com o chassi é, em ordem decrescente: $102,4^\circ$ (dianteira direita), $102,4^\circ$ (dianteira esquerda), $101,4^\circ$ (intermediária direita), $100,4^\circ$ (intermediária esquerda), $100,4^\circ$ (traseira direita) e $100,4^\circ$ (traseira esquerda). Todos os ângulos sofrem aumento em seu valor em comparação com a suspensão 1, tendo em vista o aumento da distensão da suspensão.

A força vertical em cada roda, F_V , está representada na figura 48. Todas as rodas iniciam com força vertical zero, por não terem contato com o solo. Em seguida, na condição de equilíbrio, a força é, em ordem decrescente, de: 25623,5 N (traseira direita), 25621,2 N (traseira esquerda), 22886,72 N (intermediária esquerda), 22879,8 N (intermediária esquerda), 20299,9 N (dianteira esquerda) e 20303,6 N (dianteira direita). Assim como na suspensão 1, maior parte da carga suportada pelo veículo é no eixo traseiro, seguido do eixo intermediário e do eixo dianteiro. Também é observado que a soma das forças verticais quando atingido o equilíbrio estático é igual ao peso do veículo completo.

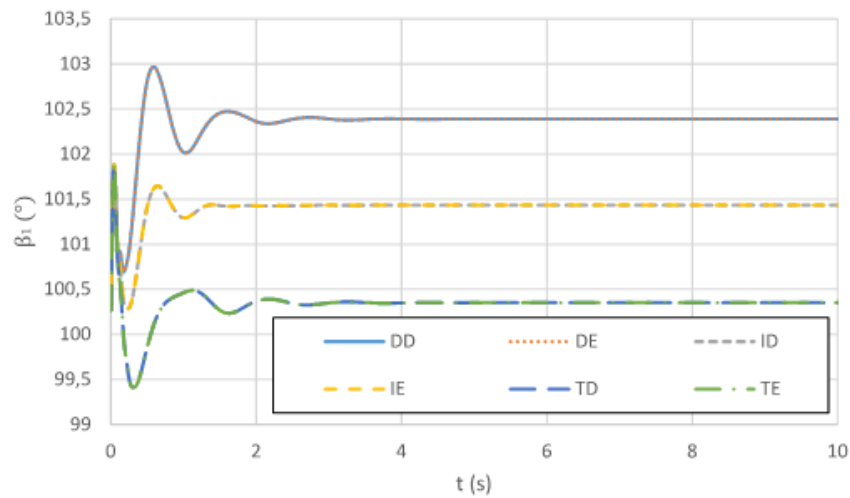


Figura 47 – Ângulo do braço inferior com o chassi – sim. 1, suspensão 2

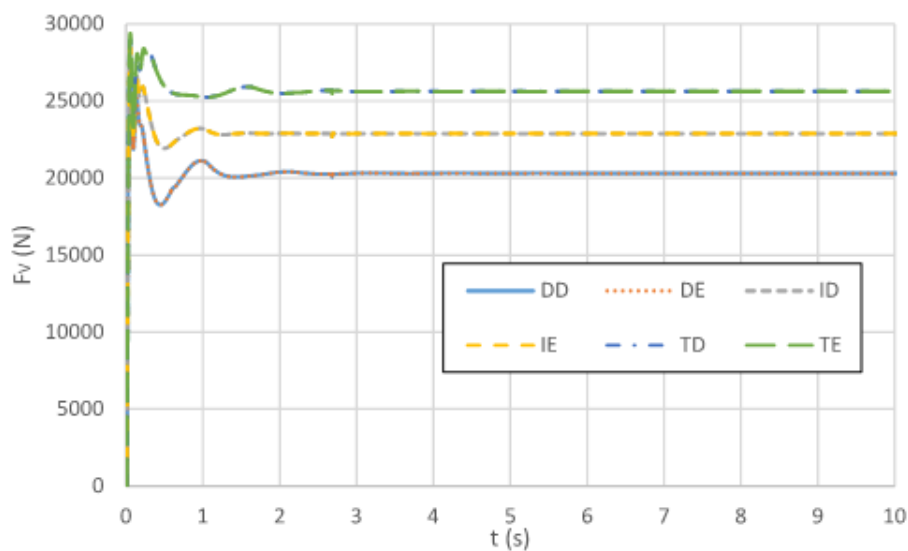


Figura 48 – Força vertical em cada roda – sim. 1, suspensão 2

O ângulo de câmbor de cada roda está representado na figura 49. Na condição de equilíbrio, esse ângulo é, em ordem decrescente, de: $0,44^\circ$ (traseira direita), $0,44^\circ$ (traseira esquerda), $0,17^\circ$ (intermediária direita), $0,17^\circ$ (intermediária esquerda), $0,06^\circ$ (dianteira direita) e $0,06^\circ$ (dianteira esquerda). Em comparação com a suspensão 1, houve uma redução no ângulo de câmbor, em virtude da mudança do ângulo β_1 da suspensão.

O ângulo de convergência de cada eixo, ϵ , está representado na figura 50. Na condição de equilíbrio, o ângulo de convergência é, em ordem decrescente, de: $2,5^\circ$ (dianteira), $1,4^\circ$ (intermediária), $-0,7^\circ$ (traseira). A justificativa da mudança do ângulo de convergência, assim como o ângulo de câmbor, deve-se à mudança do ângulo β_1 da suspensão.

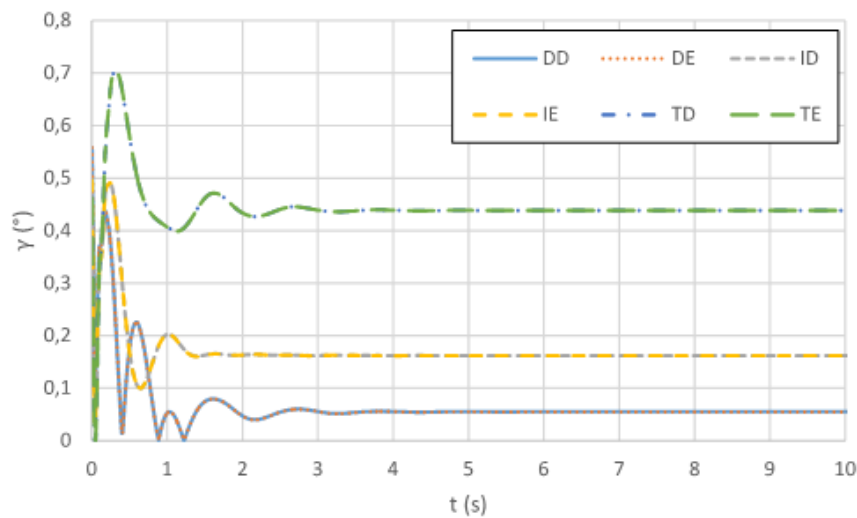


Figura 49 – Ângulo de câmbio das rodas – sim. 1, suspensão 2

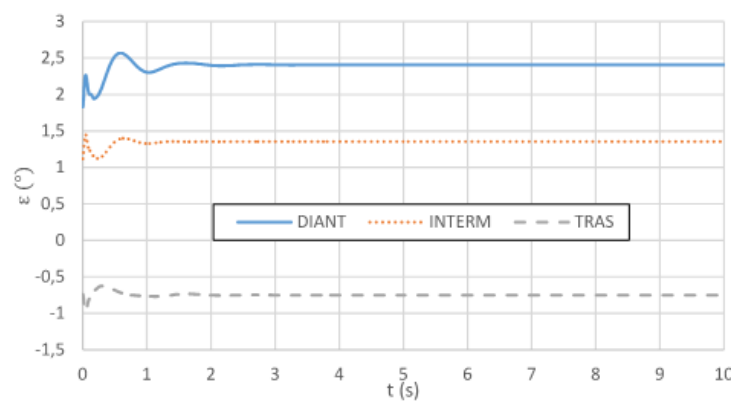


Figura 50 – Ângulo de convergência dos eixos – sim. 1, suspensão 2

As figuras 51, 52 e 53 apresentam os ângulos de *pitch*, *roll* e orientação do veículo, respectivamente. Na condição de equilíbrio, os ângulos de *pitch*, *roll* e orientação são, respectivamente: $-0,5^\circ$, $-1,0 \cdot 10^{-5}^\circ$ e $5,0 \cdot 10^{-5}^\circ$.

Na figura 51, o ângulo de *pitch* levemente negativo indica que a dianteira do veículo está levemente acima da traseira (referencial ISO 4130 (21)). Isso está de acordo com o fato dos braços da suspensão traseira apresentarem maior ângulo do que os braços da suspensão dianteira, conforme consta na figura 47, levantando a traseira do veículo.

Na figura 52, o ângulo de *roll* de valor aproximadamente nulo deve-se ao fato dos braços da suspensão esquerda apresentarem ângulo igual aos braços da suspensão direita, de acordo com a figura 47. E na figura 53, o ângulo de orientação estabiliza em $5,0 \cdot 10^{-5}^\circ$, sendo o ângulo de esterçamento do volante igual a $1 \cdot 10^{-2}^\circ$.

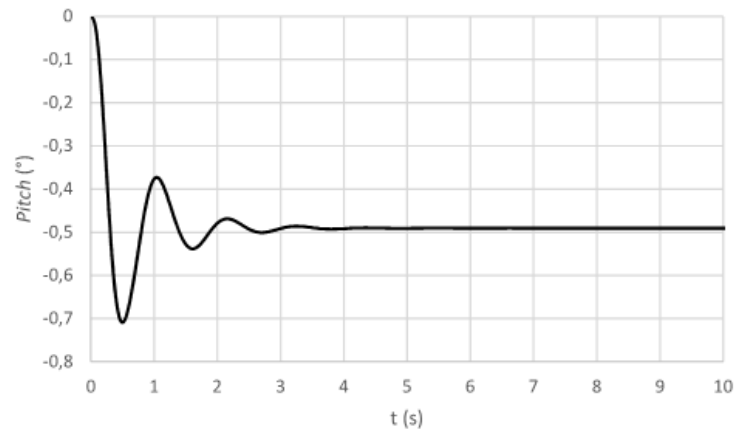


Figura 51 – Ângulo de *pitch* do veículo – sim. 1, suspensão 2

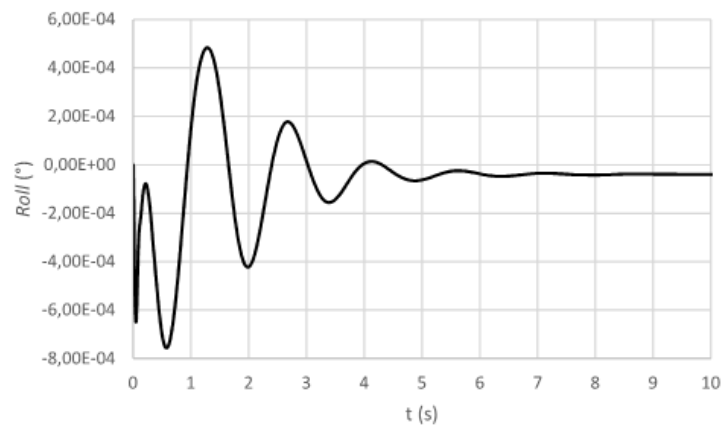


Figura 52 – Ângulo de *roll* do veículo – sim. 1, suspensão 2

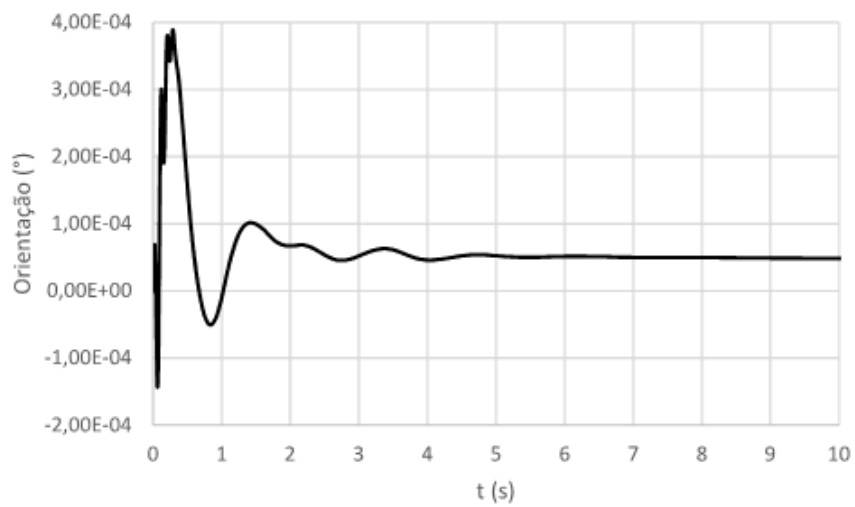


Figura 53 – Ângulo de orientação do veículo – sim. 1, suspensão 2

4.2.3 Suspensão 3

As figuras 54 a 61 mostram o comportamento do veículo até atingir o equilíbrio estático vertical com a suspensão 3. Convém ressaltar que, para esta suspensão, o tempo para acomodação da suspensão é de 25 segundos, maior que as duas outras suspensões.

Na figura 54, observa-se que o veículo foi liberado de uma altura de 1,65 m, sem contato com o solo e próximo de sua posição de equilíbrio, seguindo oscilações amortecidas do centro de gravidade do chassi até atingir o regime permanente. A altura de equilíbrio do centro de gravidade do chassi é de 1,61 m, maior que a altura das suspensões 1 e 2, em virtude da maior distensão da suspensão na condição de equilíbrio.

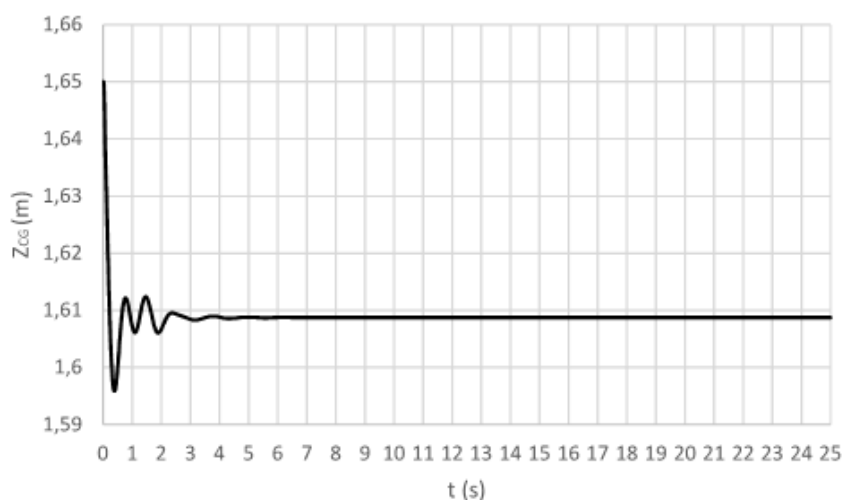


Figura 54 – Altura do CG em relação ao solo – sim. 1, suspensão 3

A figura 55 apresenta o ângulo do braço inferior de cada suspensão com o chassi, β_i . Todas as suspensões foram liberadas de um ângulo inicial de 122° , próximo à posição de equilíbrio, observando-se oscilações amortecidas dos braços de suspensão, de modo que, no equilíbrio, o ângulo de cada braço da suspensão com o chassi é, em ordem decrescente: $125,9^\circ$ (dianteira direita), $125,9^\circ$ (dianteira esquerda), $123,0^\circ$ (intermediária direita), $123,0^\circ$ (intermediária esquerda), $118,3^\circ$ (traseira direita) e $118,3^\circ$ (traseira esquerda). Todos os ângulos sofrem aumento em seu valor em comparação às suspensões 1 e 2, tendo em vista o aumento da distensão da suspensão.

A força vertical em cada roda, F_V , está representada na figura 56. Todas as rodas iniciam com força vertical zero, por não terem contato com o solo. Em seguida, na condição de equilíbrio, a força é, em ordem decrescente, de: 28674,2 N (intermediária direita), 28703,0 N (intermediária esquerda), 23183,4 N (traseira esquerda), 28173,54 N (traseira direita), 16947,9 N (dianteira direita) e 16932,7 N (dianteira esquerda). Neste caso, o maior peso é suportado pelo eixo intermediário, seguido do eixo traseiro e do eixo dianteiro.

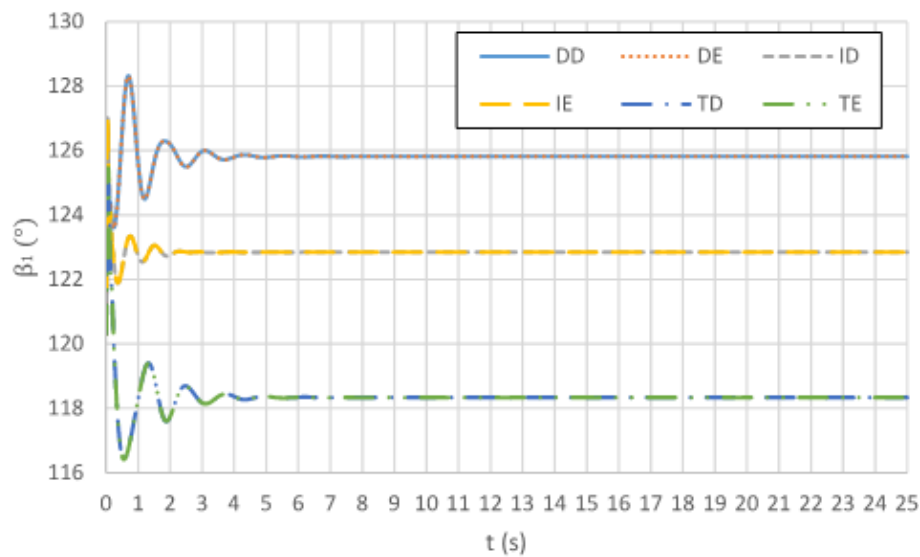


Figura 55 – Ângulo do braço inferior com o chassi – sim. 1, suspensão 3

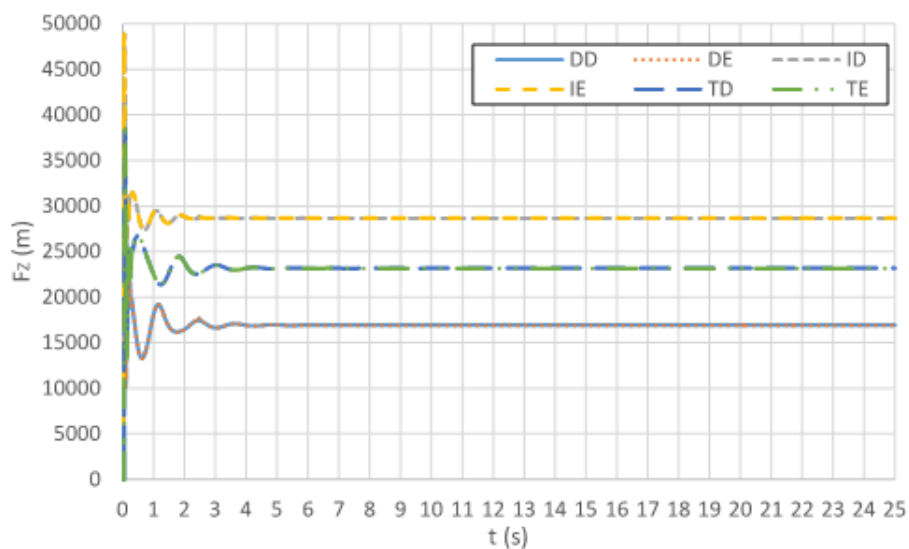


Figura 56 – Força vertical em cada roda – sim. 1, suspensão 3

O ângulo de câmbio de cada roda está representado na figura 57. Na condição de equilíbrio, esse ângulo é, em ordem decrescente, de: $7,7^\circ$ (dianteira direita), $7,7^\circ$ (dianteira esquerda), $6,7^\circ$ (intermediária direita), $6,7^\circ$ (intermediária esquerda), $5,3^\circ$ (dianteira direita) e $5,3^\circ$ (dianteira esquerda). Em comparação com as suspensões 1 e 2, houve um aumento no ângulo de câmbio, em virtude da mudança do ângulo β_1 da suspensão.

O ângulo de convergência de cada eixo, ϵ , está representado na figura 58. Na condição de equilíbrio, o ângulo de convergência é, em ordem decrescente, de: $9,0^\circ$ (dianteira), $6,0^\circ$ (intermediária), $-3,5^\circ$ (traseira). A justificativa da mudança do ângulo de convergência, assim como o ângulo de câmbio, deve-se à mudança do ângulo β_1 da suspensão.

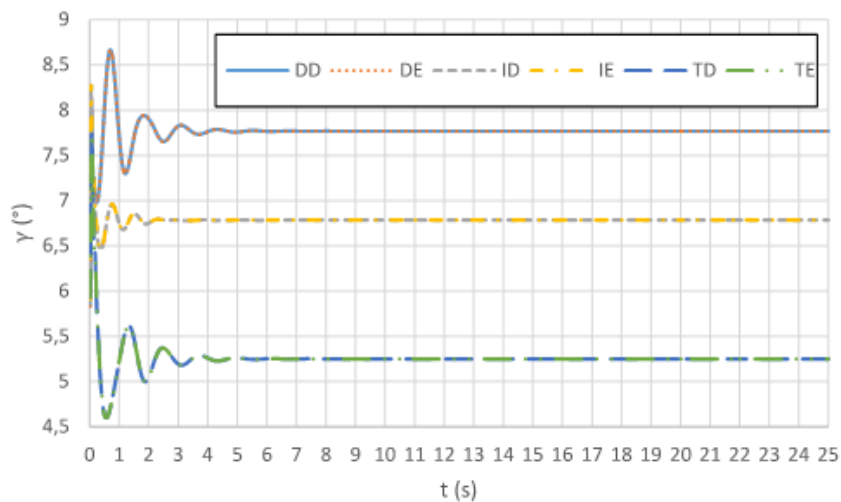


Figura 57 – Ângulo de câmbor das rodas – sim. 1, suspensão 3

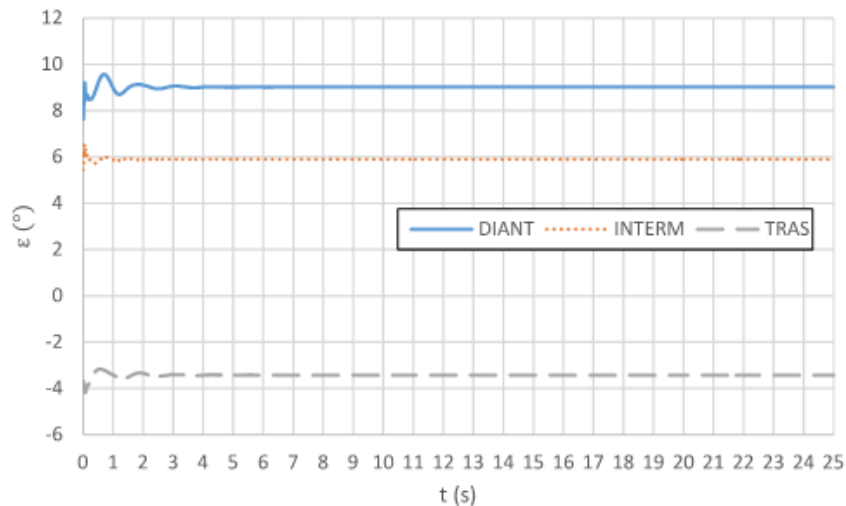


Figura 58 – Ângulo de convergência dos eixos – sim. 1, suspensão 3

As figuras 59, 60 e 61 apresentam os ângulos de *pitch*, *roll* e do veículo, respectivamente. Na condição de equilíbrio, os ângulos de *pitch*, *roll* e orientação são, respectivamente: $-1,5^\circ$, $-2,0 \cdot 10^{-4}^\circ$ e $5,0 \cdot 10^{-3}^\circ$.

Na figura 59, o ângulo de *pitch* levemente negativo indica que a dianteira do veículo está levemente acima da traseira (referencial ISO 4130 (21)). Isso está de acordo com o fato dos braços da suspensão traseira apresentarem maior ângulo do que os braços da suspensão dianteira, conforme consta na figura 55, levantando a traseira do veículo.

Na figura 60, o ângulo de *roll* de valor aproximadamente nulo deve-se ao fato dos braços da suspensão esquerda apresentarem ângulo igual aos braços da suspensão direita, de acordo com a figura 55. E na figura 61, o ângulo de orientação estabiliza em $5,0 \cdot 10^{-3}^\circ$, sendo o ângulo de esterçamento do volante igual a $3 \cdot 10^{-2}^\circ$.

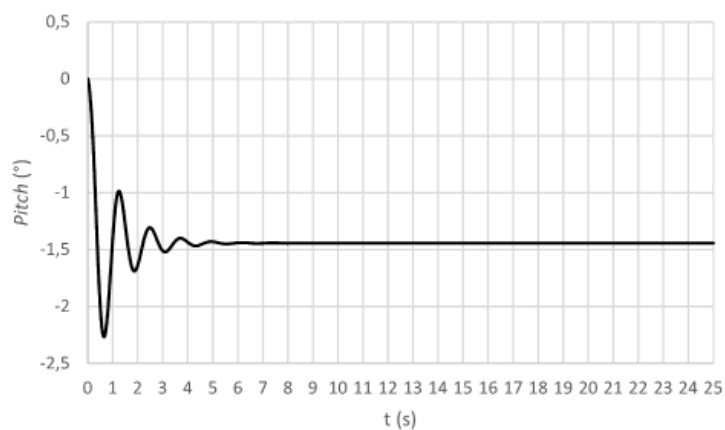


Figura 59 – Ângulo de *pitch* do veículo – sim. 1, suspensão 3

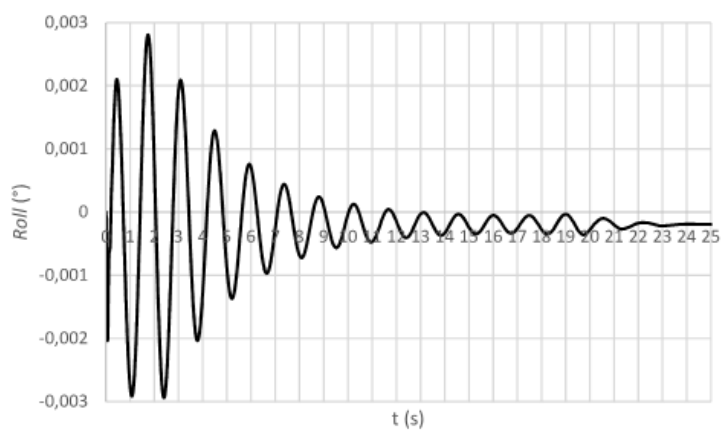


Figura 60 – Ângulo de *roll* do veículo – sim. 1, suspensão 3

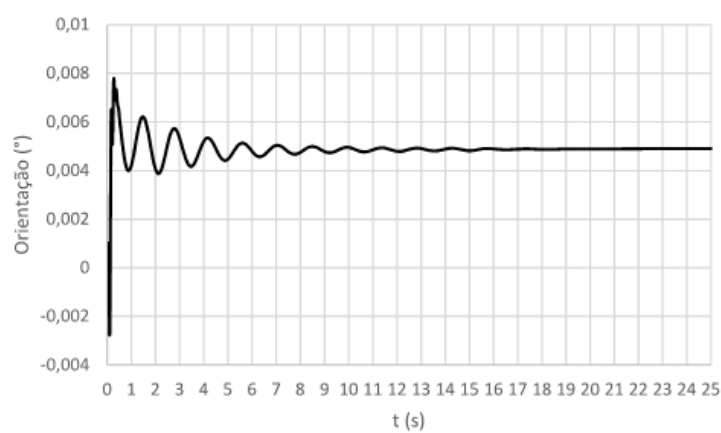


Figura 61 – Ângulo de orientação do veículo – sim. 1, suspensão 3

4.3 Trajetória circular em regime permanente

Após atingida a posição de equilíbrio vertical, submete-se o veículo a uma trajetória circular em regime permanente. Neste ensaio, mantendo-se a velocidade do veículo e o esterçamento do volante constantes, busca-se analisar o comportamento das variáveis: ângulos de *pitch*, *roll* e orientação, forças verticais e laterais em cada roda, aceleração lateral do veículo e o gradiente de subesterçamento, caracterizando neste último caso o seu comportamento direcional.

O gradiente de subesterçamento é a grandeza que informa o quanto o ângulo de esterçamento equivalente das rodas se distancia do ângulo de esterçamento de Ackerman em função da aceleração lateral, sendo calculado como a taxa de variação da diferença entre o ângulo de desvio dianteiro e o ângulo de desvio traseiro em função da aceleração lateral do veículo, de acordo com Chagas (8). Aplicando esta definição tem-se:

$$K = \frac{d\delta_{eq}}{da_y} = \frac{d(\delta_f - \delta_r)}{da_y} \quad (4.1)$$

Onde K é o gradiente de subesterçamento, a_y é a aceleração lateral do veículo, δ_{eq} é o ângulo de esterçamento equivalente, δ_f e δ_r são a média aritmética dos esterçamentos nas rodas dianteira e traseira, respectivamente.

O fenômeno denominado subesterçamento (*understeer*) caracteriza-se pela tendência apresentada pelo veículo de aumentar o raio de curvatura com o aumento da velocidade. Neste caso, o veículo tende a “sair de dianteira”, isto é, perder a aderência no eixo dianteiro.

Quando o gradiente de subesterçamento é negativo, o veículo apresenta comportamento sobreesterçante (*oversteer*). E quando o gradiente de esterçamento é nulo, o veículo apresenta um comportamento neutro de esterçamento (*neutral steer*).

Observando a trajetória percorrida pelo centro de gravidade do veículo, assim como calculando o gradiente de subesterçamento, será possível analisar se o veículo terá tendência a subesterçar ou sobreesterçar.

São realizadas simulações para três tipos de suspensão e três tipos de pneu, com um esterçamento de 45° no volante (esterçamento igual ao utilizado no teste de manobra dupla evasiva) e velocidades de 28 km/h e 60 km/h, sendo a velocidade de 28 km/h adotada por ser a mesma velocidade do teste de manobra dupla evasiva, e a velocidade de 60 km/h foi adotada com a intenção de verificar o comportamento direcional do veículo a uma velocidade maior que 28 km/h.

O esterçamento do volante q_{vol} , em graus, é calculado em função do tempo t , em segundos por:

$$q_{vol} = \begin{cases} q_0, & t \leq t_{início} \\ q_0 + 45 \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t - t_{início}}{5} \right), & t_{início} < t \leq t_{início} + 5 \\ q_0 + 45, & t > t_{início} + 5 \end{cases} \quad (4.2)$$

Na equação 4.2, q_0 é o esterçamento do volante que estabiliza o ângulo de orientação do veículo, e depende do tipo de suspensão: $-0,2^\circ$ para a suspensão 1, $1 \cdot 10^{-2}^\circ$ para a suspensão 2 e $2 \cdot 10^{-2}^\circ$ para a suspensão 3. O tempo de início da manobra, $t_{início}$, é 10 segundos para as suspensões 1 e 2 e 25 segundos para a suspensão 3.

A figura 62 representa o esterçamento do volante para as suspensões 1 e 2, entre 5 e 25 segundos.

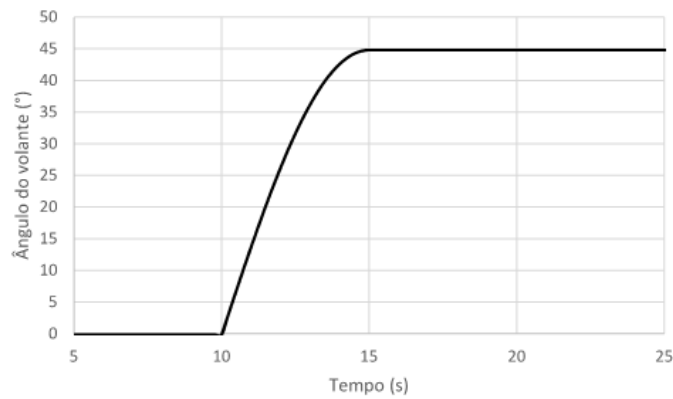


Figura 62 – Esterçamento do volante na sim 2 para as suspensões 1 e 2

A figura 63 representa o esterçamento do volante para a suspensão 3, entre 22 e 35 segundos.

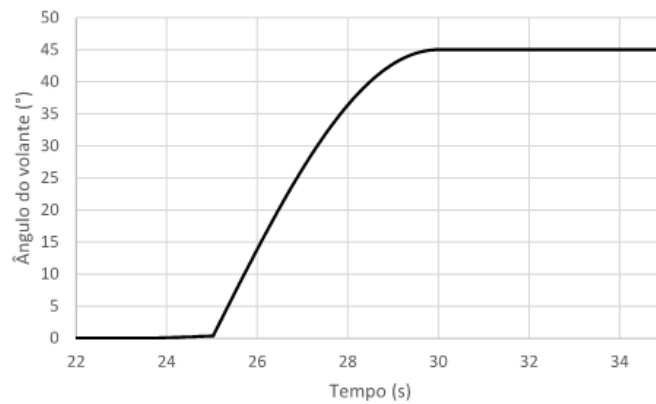


Figura 63 – Esterçamento do volante na sim 2 para a suspensão 3

4.3.1 Suspensão 1

4.3.1.1 Velocidade de 28 km/h

Nesta simulação, o veículo mantém o esterçamento do volante em 45° e a velocidade do veículo é mantida em 28 km/h.

A figura 64 apresenta a posição do centro de gravidade do veículo utilizando os três pneus.

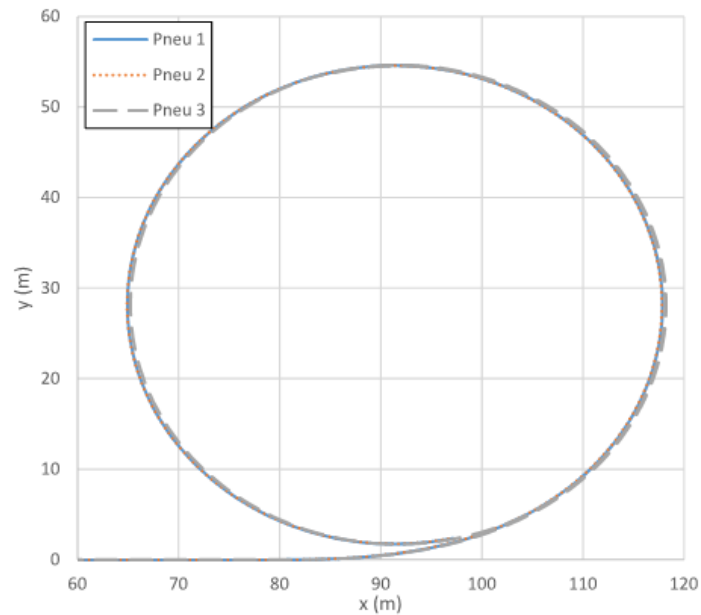


Figura 64 – Posição do CG do veículo durante a manobra- susp 1

De acordo com a figura 64, o percurso do veículo é uma circunferência de raio aproximadamente igual a 30 m. Há pouca diferença entre o percurso dos três pneus, uma vez que o *cornering coefficient* entre os pneus é próximo, de acordo com as equações 3.2 a 3.4. Apesar disso, observa-se que o veículo com o pneu 3 executa uma curva de raio levemente maior, pois possui o menor *cornering coefficient*. Portanto sua força lateral é menor, e por atuar como força centrípeta, aumenta o raio do percurso.

As figuras 65 a 68 apresentam as forças laterais do veículo na manobra. Verifica-se que as forças laterais sofrem um aumento em virtude do aumento do ângulo de desvio de cada roda ao iniciar a curva. Em seguida, após estabilização do movimento de rolagem, atingem um valor constante.

Sabe-se, de acordo com as equações 3.2 a 3.4, que o pneu com maior valor de *cornering coefficient* é o pneu 2, seguido do pneu 1 e do pneu 3. Portanto, como se observa nas figuras 65 a 68, a maior força lateral é produzida pelo pneu 2, seguido do pneu 1 e do pneu 3.

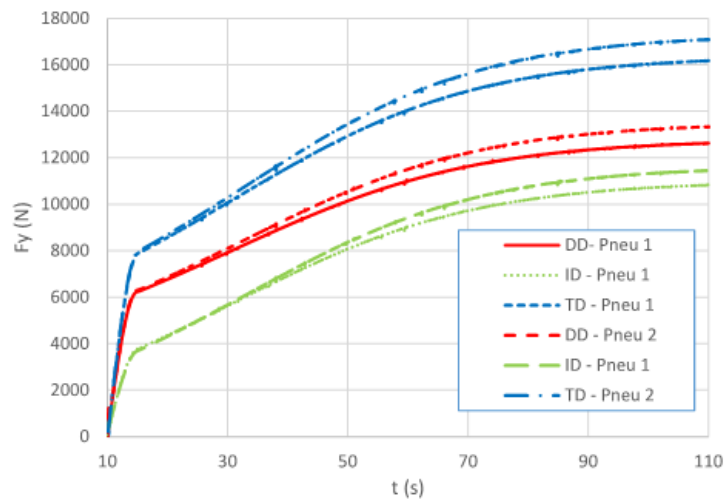


Figura 65 – Forças laterais produzidas pelos pneus do lado direito – pneus 1 e 2

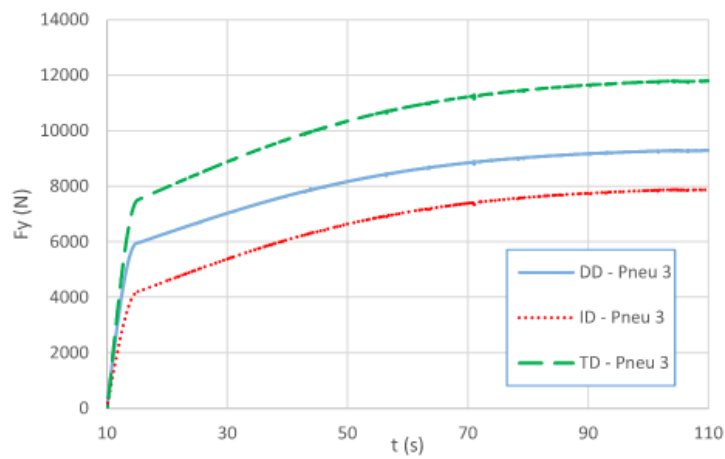


Figura 66 – Forças laterais produzidas pelos pneus do lado direito – pneu 3

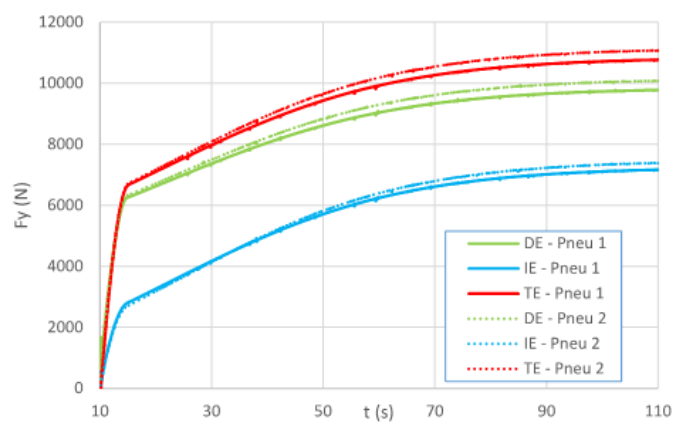


Figura 67 – Forças laterais produzidas pelos pneus do lado esquerdo – pneu 3

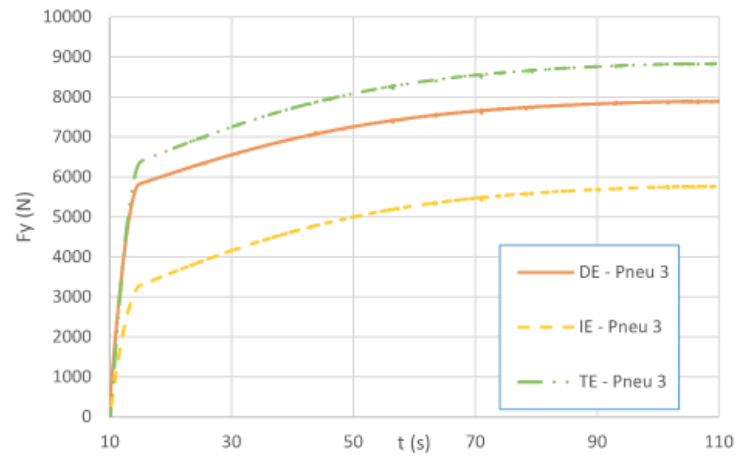


Figura 68 – Forças laterais produzidas pelos pneus do lado esquerdo – pneu 3

A soma das forças laterais, para cada tipo de pneu, é:

$$\sum F_{pneu1} \approx 67370N \quad (4.3)$$

$$\sum F_{pneu2} \approx 40460N \quad (4.4)$$

$$\sum F_{pneu3} \approx 51500N \quad (4.5)$$

É possível comparar estes valores com o valor da força centrípeta F_{cp} , calculada em função da massa total do veículo m (considerando a massa dos pneus e elementos de suspensão), da velocidade v e do raio da trajetória R por:

$$F_{cp} = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (4.6)$$

Portanto:

$$F_{cp} \approx 28230N \quad (4.7)$$

Tem-se que a força centrípeta é inferior à soma das forças laterais dos pneus, pois as forças laterais não estão exatamente alinhadas na direção radial, possuindo uma componente tangencial. Para o equilíbrio das forças na direção tangencial, deve-se considerar forças como a resistência ao rolamento, força aerodinâmica e força trativa. Este estudo, no entanto, não é feito neste trabalho, assumindo que o somatório das forças nesta direção é nulo e que o veículo mantém a sua velocidade constante.

A figura 69 apresenta as forças verticais em cada roda. Verifica-se que as forças verticais apresentam uma variação em virtude da transferência dinâmica de peso: ao executar a curva para a esquerda, as rodas do lado esquerdo têm uma redução de força vertical, enquanto as rodas do lado direito têm um aumento de força vertical.

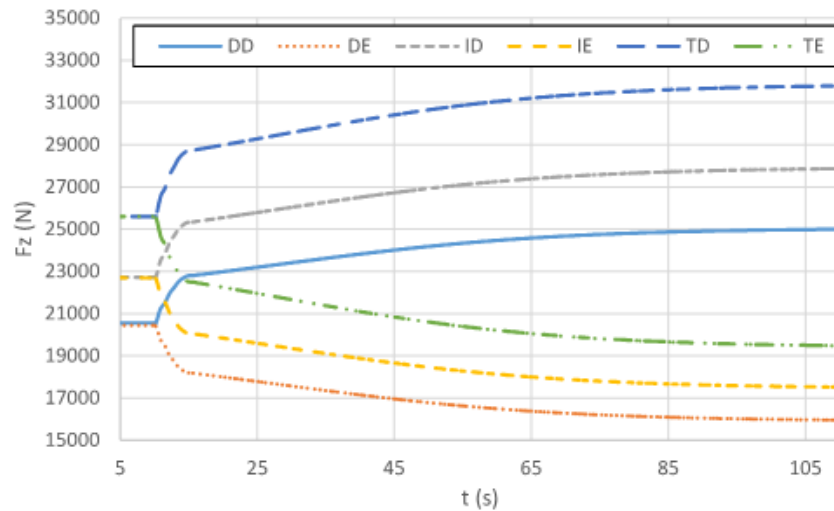


Figura 69 – Forças verticais sobre as rodas.

A figura 70 apresenta o ângulo de *roll* do veículo. Como o veículo faz uma curva para a esquerda, o veículo tenderá a inclinar-se no sentido positivo de rotação, considerando o referencial do veículo, e o ângulo de *roll* cresce. Ao entrar em regime permanente, o veículo tem um ângulo de *roll* constante, que é igual a $1,62^\circ$ para o veículo com pneu 2, $1,59^\circ$ para o pneu 2 e $1,21^\circ$ para o pneu 3. Como o pneu 3 possui o menor *cornering coefficient*, produz menores forças laterais, e conseqüentemente a rolagem do chassi é menor.

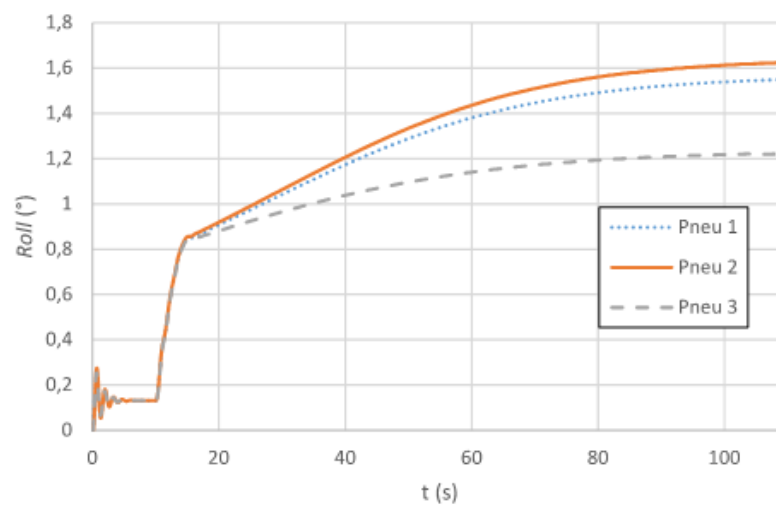


Figura 70 – Ângulo de *roll* do veículo.

A figura 71 apresenta o comportamento do ângulo de *pitch*. A variação deste ângulo na manobra é inferior a $0,01^\circ$, variação esta causada pela combinação da variação de *roll* e orientação do veículo.

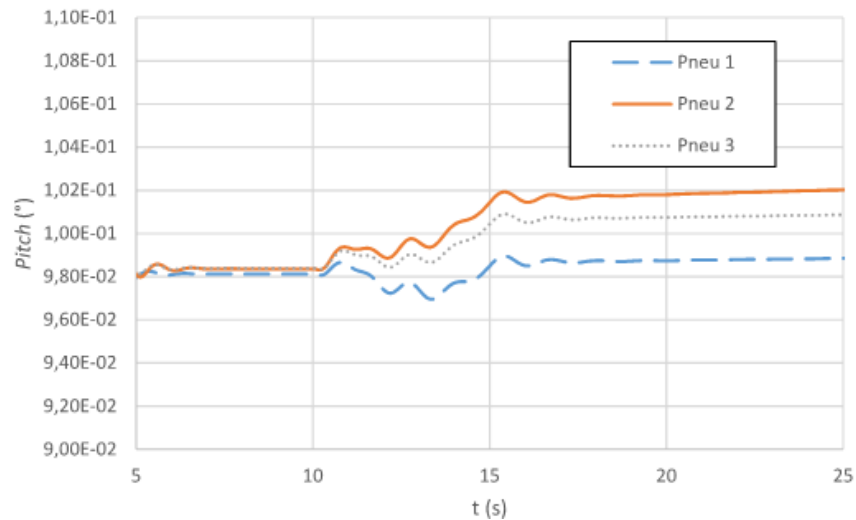


Figura 71 – Ângulo de *pitch* do veículo.

A figura 72 apresenta o ângulo de orientação do veículo. O ângulo de orientação cresce a uma taxa constante em virtude de percorrer uma trajetória circular em velocidade constante. O modelo com o pneu 3 possui menor inclinação, em virtude de percorrer uma trajetória circular de raio levemente maior, diminuindo a taxa de crescimento do ângulo de orientação. Ao final da simulação, o ângulo de orientação é de aproximadamente 2200° para os pneus 1 e 2, e 2000° para o pneu 3, significando que o veículo percorre pouco mais que seis voltas completas (360°) com os pneus 1 e 2, e 5,5 voltas com o pneu 3.

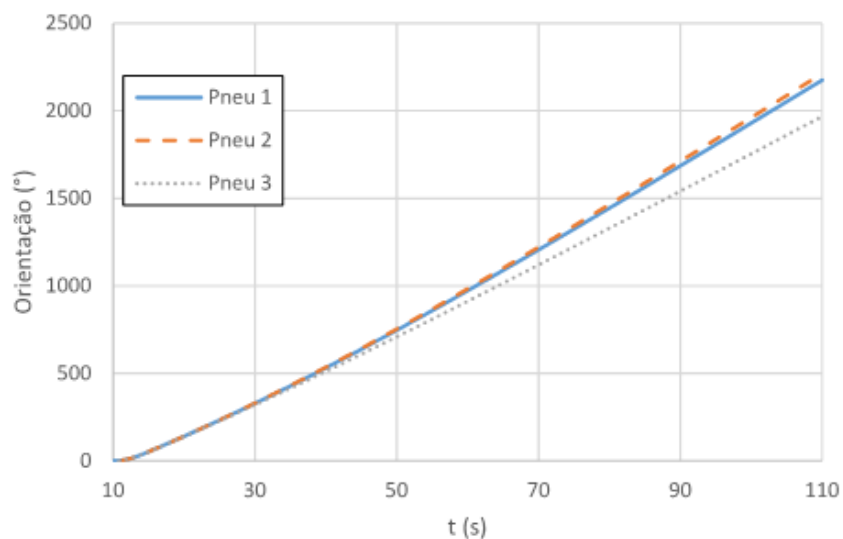


Figura 72 – Ângulo de orientação do veículo

A figura 73 apresenta o esterçamento equivalente, δ_{eq} , em função da aceleração lateral do veículo a_y . Neste gráfico, o gradiente de subesterçamento é calculado pelo coeficiente angular da reta tangente. Como o gráfico é crescente, então tem-se um valor de K positivo, indicando um comportamento subesterçante.

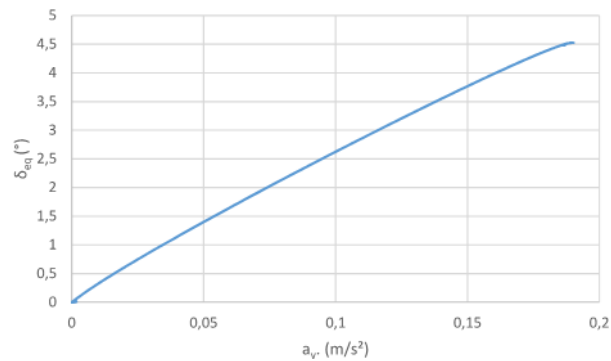


Figura 73 – Esterçamento equivalente em função da aceleração lateral do veículo

4.3.1.2 Velocidade de 60 km/h

Nesta simulação, o veículo mantém o esterçamento do volante em 45° e a velocidade do veículo é mantida em 60 km/h. Utiliza-se somente o pneu 1, uma vez que a intenção desta simulação é comparar com os resultados da simulação com velocidade de 28 km/h.

A figura 74 apresenta a posição do centro de gravidade do veículo. Observa-se a tendência do veículo em aumentar o raio de curvatura, mais uma vez caracterizando o seu comportamento subesterçante.

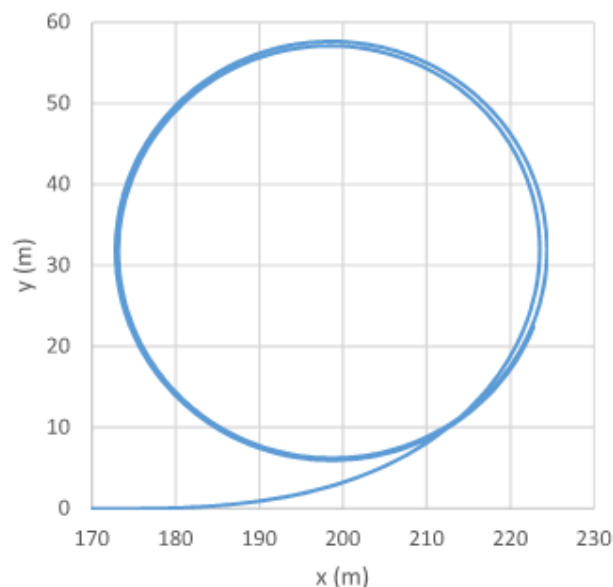


Figura 74 – Posição do centro de gravidade do veículo durante a manobra.

As figuras 75 a 79 apresentam os ângulos de *roll*, *pitch* e orientação do veículo e as forças lateral e vertical das rodas, cujo comportamento é semelhante à simulação com 28 km/h, sendo que, devido à maior velocidade, há maior transferência dinâmica de peso, sofrendo conseqüentemente maior variação.

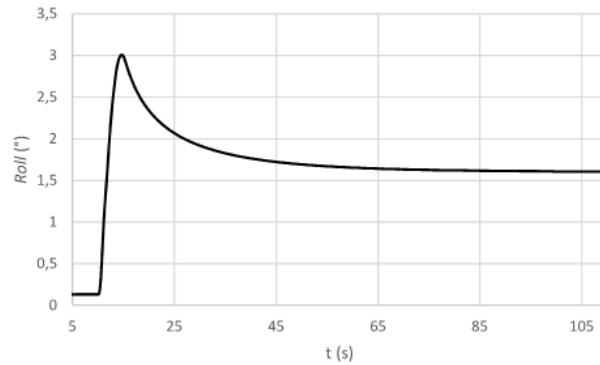


Figura 75 – Variação do ângulo de *roll* da carroceria.

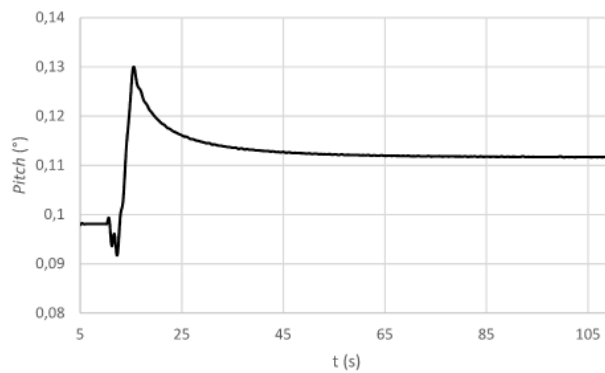


Figura 76 – Variação do ângulo de *pitch* da carroceria.

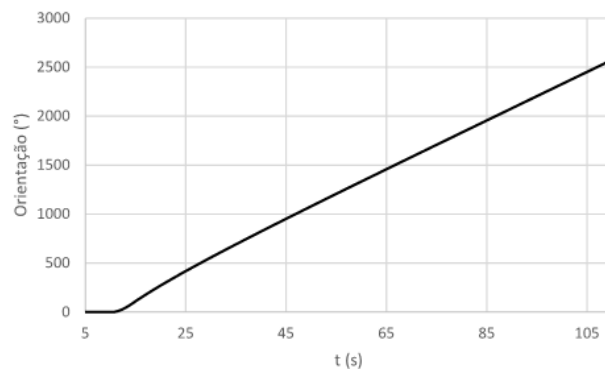


Figura 77 – Variação do ângulo de orientação da carroceria.

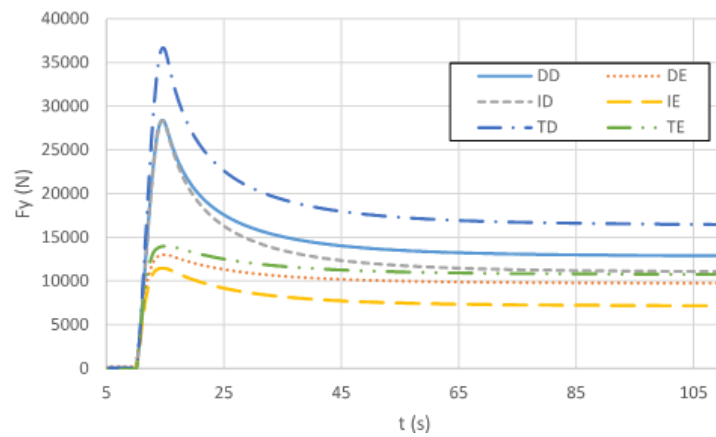


Figura 78 – Comportamento das forças laterais produzidas pelos pneus.

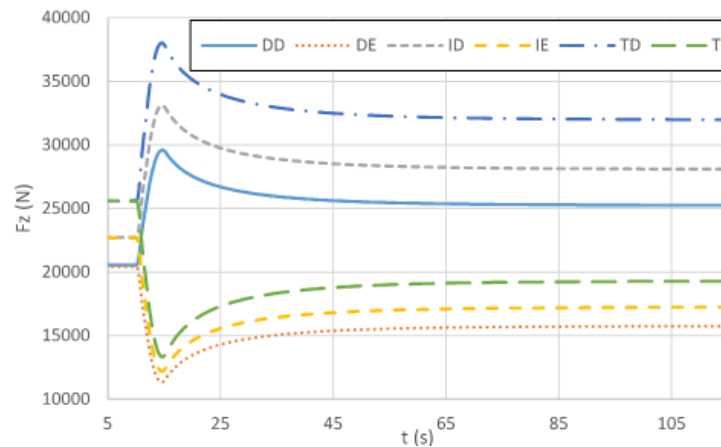


Figura 79 – Força vertical das rodas

4.3.2 Suspensões 2 e 3

Esta simulação tem por finalidade comparar os resultados das simulações das suspensões 1, 2 e 3 para um mesmo tipo de pneu, executando uma trajetória circular em regime permanente. São analisadas a trajetória do veículo e variação dos ângulos de *pitch*, *roll* e orientação. É empregado o pneu 1 e a velocidade do veículo é de 28 km/h.

A figura 80 apresenta a trajetória do centro do veículo. Observa-se que a suspensão 3 é a que possui maior raio de curvatura. Explica-se o resultado diferente para cada suspensão pela mudança na geometria de suspensão e conseqüentemente no ângulo de desvio dos pneus, acarretando em mudança nas forças laterais.

As figuras 81 a 83 apresentam, respectivamente, os ângulos de *roll*, *pitch* e orientação da carroceria.

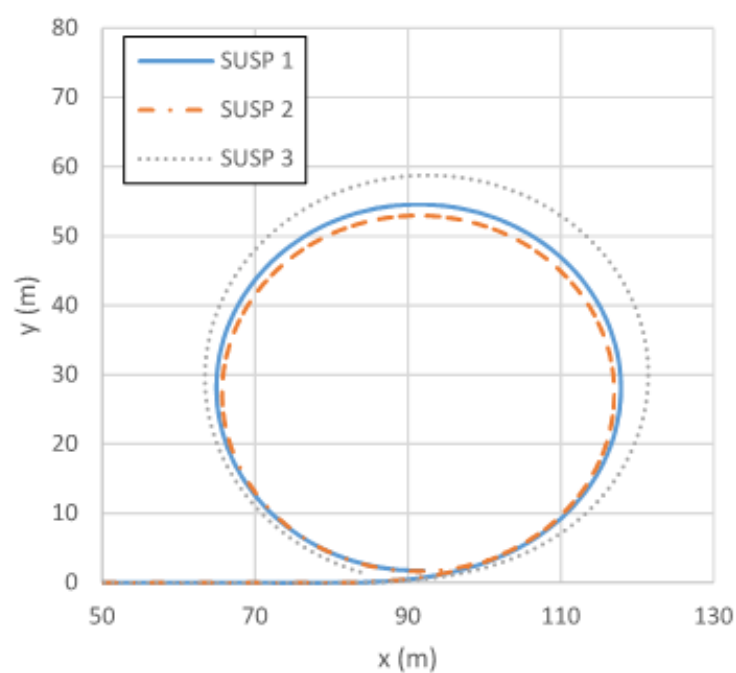


Figura 80 – Trajetória do centro de gravidade do veículo

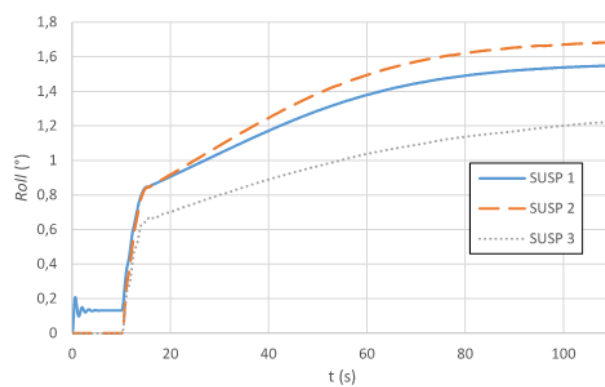


Figura 81 – Ângulo de *roll* da carroceria

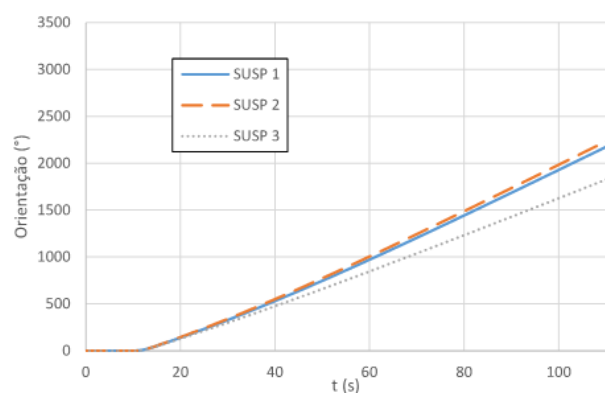
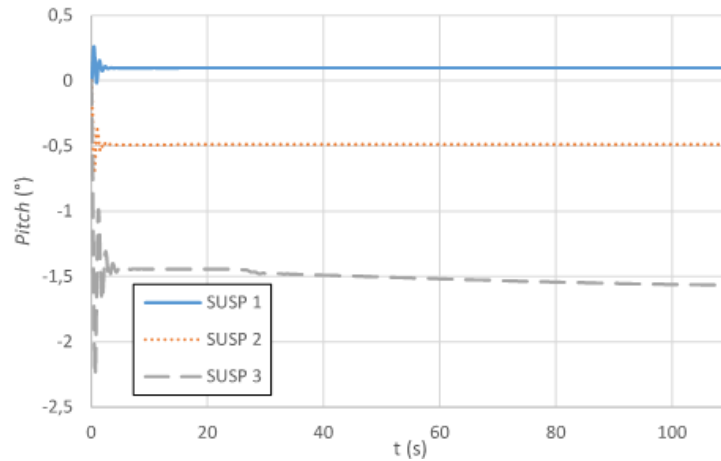


Figura 82 – Ângulo de orientação da carroceria

Figura 83 – Ângulo de *pitch* da carroceria

4.4 Manobra evasiva dupla

Uma vez atingida a condição de equilíbrio estático vertical, o veículo está pronto para realizar a manobra. Nesta simulação, tem-se por finalidade analisar a influência da variação do *cornering stiffness* no comportamento dinâmico do veículo.

A função do ângulo de esterçamento do volante, q_{vol} , em função do tempo é dada, de acordo com Genta (22) por:

$$\begin{aligned}
 q_{vol} = & \begin{cases} q_0, t \leq t_i \\ q_0 + 45 \cdot \text{sen} \left(\pi \cdot \frac{t-t_i}{1,7} \right), t_i < t \leq t_1 \\ q_0 - 45 \cdot \text{sen} \left(\pi \cdot \frac{t-t_i}{1,7} \right), t_1 < t \leq t_2 \\ q_0, t_2 < t \leq t_3 \\ q_0 - 45 \cdot \text{sen} \left(\pi \cdot \frac{t-t_i}{1,7} \right), t_3 < t \leq t_4 \\ q_0 + 45 \cdot \text{sen} \left(\pi \cdot \frac{t-t_i}{1,7} \right), t_4 < t \leq t_5 \\ q_0, t > t_5 \end{cases} \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

Observa-se na equação 4.8 que o volante gira com uma amplitude de 45° . Além disso, q_0 é o esterçamento do volante que estabiliza o ângulo de orientação do veículo, e depende do tipo de suspensão: $-0,20^\circ$ para a suspensão 1, $1 \cdot 10^{-2}^\circ$ para a suspensão 2 e $2 \cdot 10^{-2}^\circ$ para a suspensão 3.

O tempo de início da manobra, t_i , é 10 segundos para as suspensões 1 e 2 e 25 segundos para a suspensão 3. E os tempos t_1 a t_7 são calculados em função do tempo de execução da manobra, de 1,7 segundos, e das dimensões da pista:

$$t_1 = t_i + 1,7 \quad (4.9)$$

$$t_2 = t_i + 3,4 \quad (4.10)$$

$$t_3 = t_i + 3,4 + \frac{20}{v} \quad (4.11)$$

$$t_4 = t_i + 3,4 + \frac{20}{v} + 1,7 \quad (4.12)$$

$$t_5 = t_i + 3,4 + \frac{20}{v} + 3,4 \quad (4.13)$$

Onde v é a velocidade do veículo, em m/s, e $\frac{20}{v}$ representa o tempo para o veículo percorrer 20 m a uma velocidade v , onde 20 m é o comprimento do trecho 3 da figura 23.

A figura 84 apresenta o ângulo de esterçamento do volante, q_{vol} , durante a execução da manobra dupla evasiva para as suspensões 1 e 2.

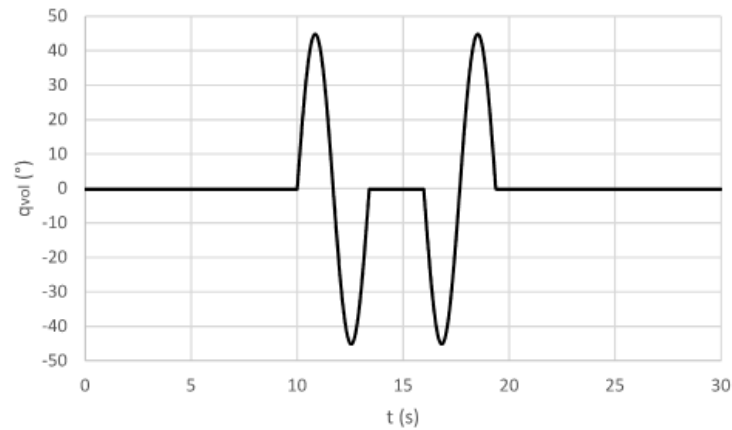


Figura 84 – Ângulo de esterçamento do volante – man 3, susp 1 e 2

A figura 85 apresenta o ângulo de esterçamento do volante, q_{vol} , durante a execução da manobra dupla evasiva para a suspensão 3.

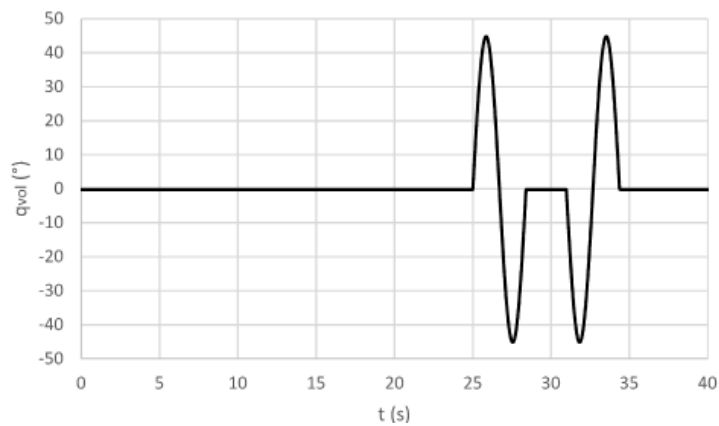


Figura 85 – Ângulo de esterçamento do volante – man 3, susp 3

Na manobra evasiva dupla, o veículo executa duas mudanças de faixa, mantendo-se em direções paralelas em cada faixa. Para executar uma única mudança de faixa, são necessários dois movimentos simétricos do volante e com perfil senoidal, um com valores positivos e outro com valores negativos. Na mudança de faixa seguinte, os valores de esterçamento do volante são negativos e em seguida positivos.

Nas simulações, foi constatado que o ângulo de desvio dos pneus durante a curva em manobra evasiva dupla era inferior a 8° . Assim, o modelo de pneu utilizado emprega uma dependência linear entre o ângulo de desvio e a força lateral desenvolvida, de acordo com Gillespie (18).

O baixo ângulo de desvio dos pneus pode ser explicado pela baixa velocidade do veículo (28 km/h). No entanto, em velocidades maiores, este deslizamento é maior, devendo ser empregado modelos de pneu mais avançados, tais como os modelos de Bakker-Pacejka (7) e modelo de Julien (23).

Apesar disso, o programa desenvolvido permite inserir este novo modelo de pneu, podendo ser utilizado em trabalhos futuros para estudar a dinâmica da VBTP Guarani em maiores velocidades.

Foram realizadas simulações considerando três suspensões e três pneus diferentes, mantendo-se em todas simulações a velocidade do veículo igual a 28 km/h.

4.4.1 Suspensão 1

Na figura 86, observa-se o comportamento do ângulo de *roll* devido à transferência dinâmica de peso, de forma que o veículo inclina-se para o lado oposto em que faz curva. Verifica-se que o gráfico fica espelhado quando o veículo faz a curva para a esquerda e para a direita, em virtude de sua simetria no plano longitudinal.

O ângulo de *yaw* tem comportamento semelhante ao ângulo de *roll*, conforme apresentado na figura 87, em virtude desta simetria.

Observa-se, ainda, que a mudança do pneu resulta em uma pequena alteração nas figuras 86 e 87, de forma que o pneu com maior *cornering coefficient*, isto é, o pneu .2, produz maior amplitude de variação dos ângulos de *roll* e orientação, em virtude de gerar maiores forças laterais e conseqüentemente maiores acelerações angulares. Seguindo a mesma lógica, o pneu 3, com menor *cornering coefficient*, produz a menor amplitude de variação dos ângulos de *roll* e orientação.

Na figura 88, o ângulo de *pitch* sofre uma variação levemente negativa e em seguida positiva com a curva para a esquerda, indicando que a carroceria inclina-se para cima e em seguida para baixo, em leve mergulho. O comportamento quando o veículo faz curva para a direita é simétrico.

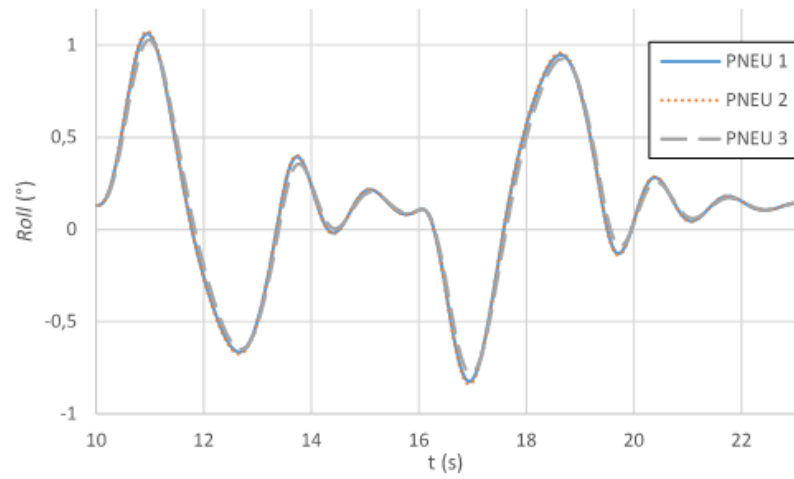


Figura 86 – Ângulo de *roll* do veículo durante a manobra

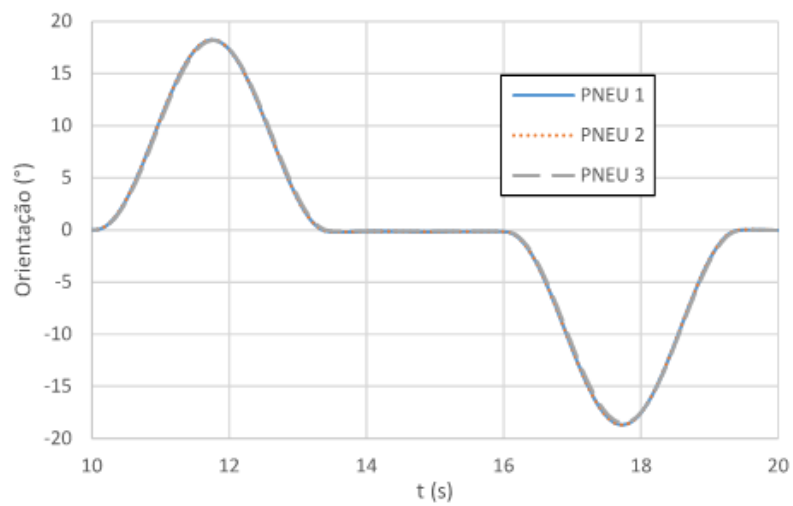


Figura 87 – Ângulo de orientação do veículo durante a manobra

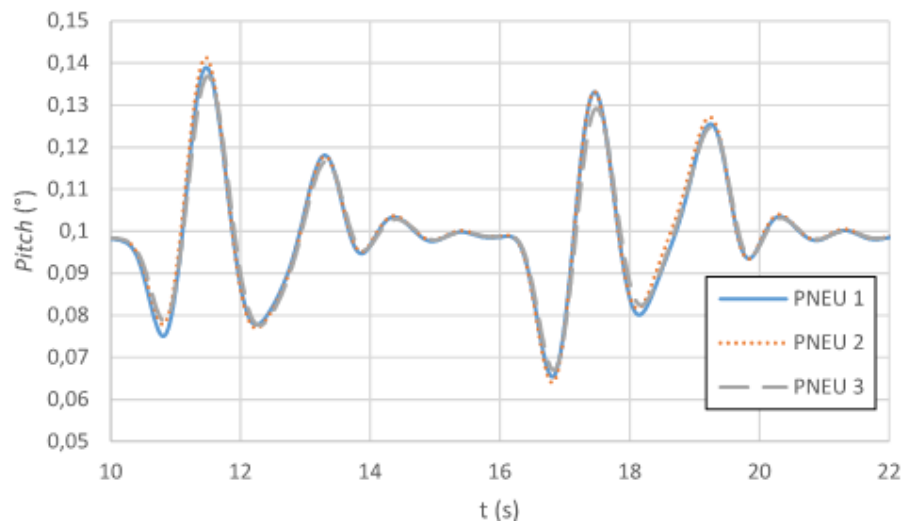


Figura 88 – Ângulo de *pitch* do veículo durante a manobra

As figuras 89 e 90 apresentam o ângulo β_1 das suspensões dos lados esquerdo e direito, respectivamente, durante a manobra. Como a curva inicia para a esquerda, os valores dos ângulos dos braços inferiores com o chassi dessas suspensões aumentam, tendo em vista a transferência dinâmica de peso para a direita. Em contrapartida, as suspensões do lado direito apresentam comportamento oposto. Quando a curva é feita para a direita, a situação se inverte. Tendo em vista que há muita proximidade entre os gráficos dos pneus 1, 2 e 3, e para uma melhor visualização, decidiu-se apresentar o gráfico somente do pneu 1. No entanto, cabe ressaltar que o gráfico do pneu 3 é o que apresenta menor amplitude de variação do ângulo do braço inferior, tendo em vista a menor aceleração produzida pelo pneu.

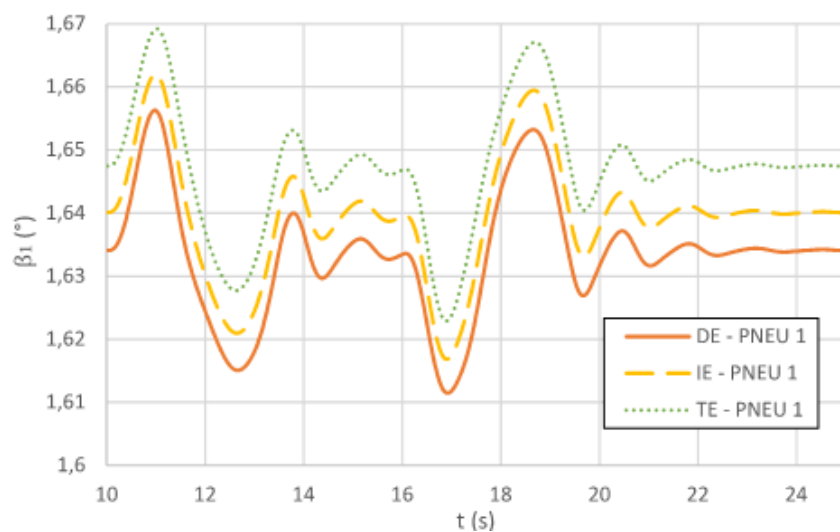


Figura 89 – Âng. dos braços inferiores esquerdos durante a manobra

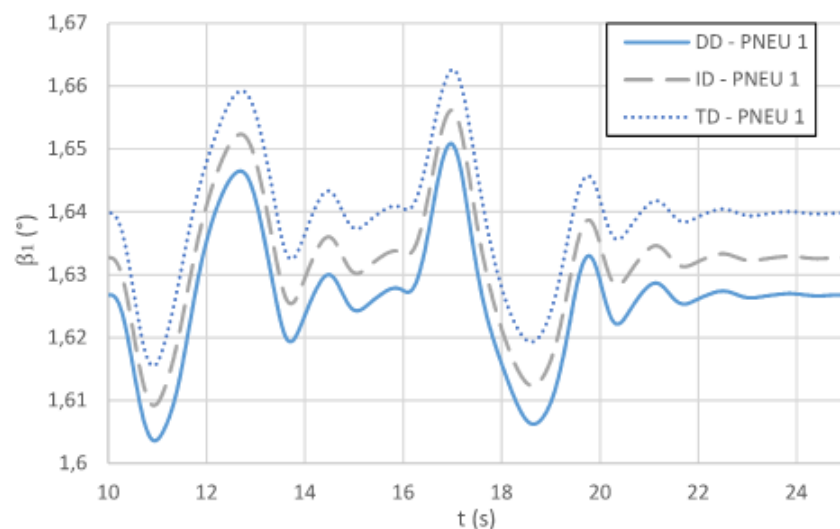


Figura 90 – Âng. dos braços inferiores direitos durante a manobra

A figura 91 mostra que o centro de gravidade da carroceria se desloca para a

esquerda na direção y , retornando em seguida para a posição original, respeitando os limites da pista, representados pela sigla LP.

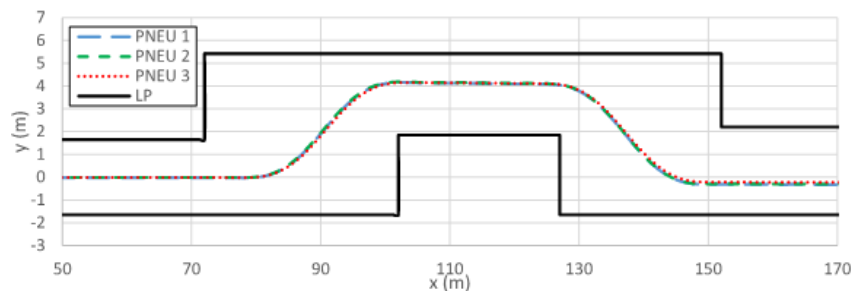


Figura 91 – Percurso do centro de gravidade do veículo

Ao realizar a curva, o centro de gravidade do veículo apresenta deslocamento vertical, em virtude do movimento combinado de rolagem e arfagem do chassi. No entanto, este deslocamento é inferior a 1,0 mm, como se pode observar na figura 92. Cabe também ressaltar que a diferença de altura deve-se à diferença de especificação entre os pneus.

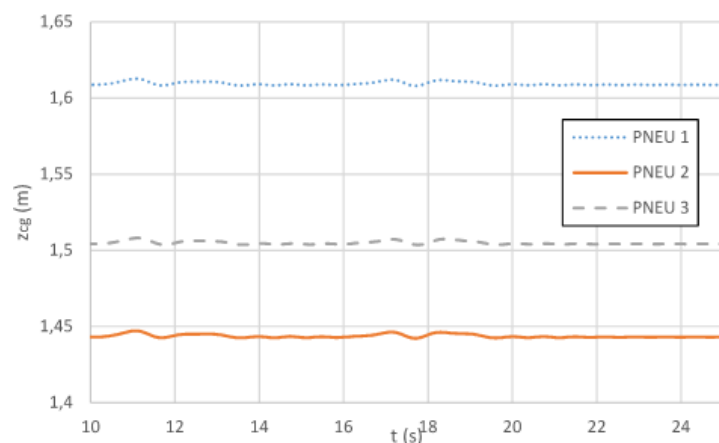


Figura 92 – Altura do centro de gravidade do veículo durante a manobra

As figuras 93 e 94 mostram a força vertical nas rodas dos lados direito e esquerdo, respectivamente. Observa-se, devido à transferência dinâmica de peso, que as rodas do lado direito sofrem um aumento da força vertical quando o veículo executa a manobra de curva para a esquerda. Em seguida, a força vertical sofre uma redução quando o veículo executa a manobra para a direita, se posicionando paralelamente à direção inicial. Observa-se um comportamento simétrico da força vertical. Além disso, comparando as figuras, observa-se que o aumento de uma das forças acarreta na redução da outra e vice-versa, tendo em vista a transferência dinâmica de peso. Tendo em vista que há muita proximidade entre os gráficos dos pneus 1, 2 e 3, e para uma melhor visualização, decidiu-se apresentar o gráfico somente do pneu 1. No entanto, cabe ressaltar que o gráfico do pneu 3 é o que apresenta menor amplitude de variação da força vertical, tendo em vista a menor aceleração produzida pelo pneu.

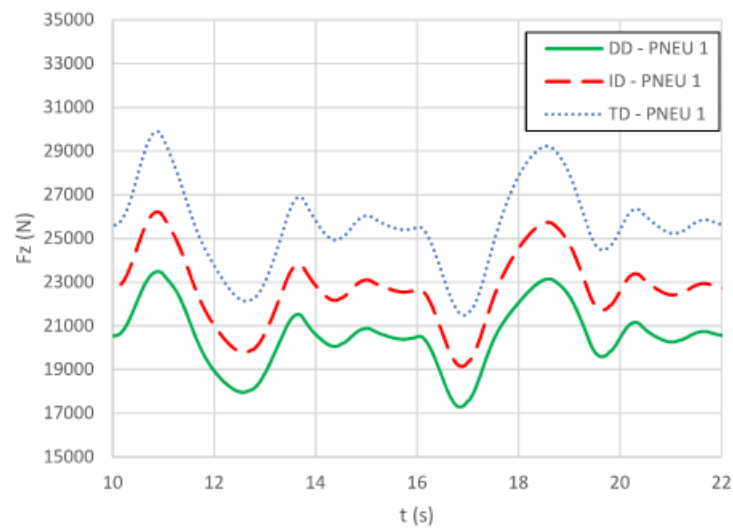


Figura 93 – Força vertical nas rodas direitas durante a manobra

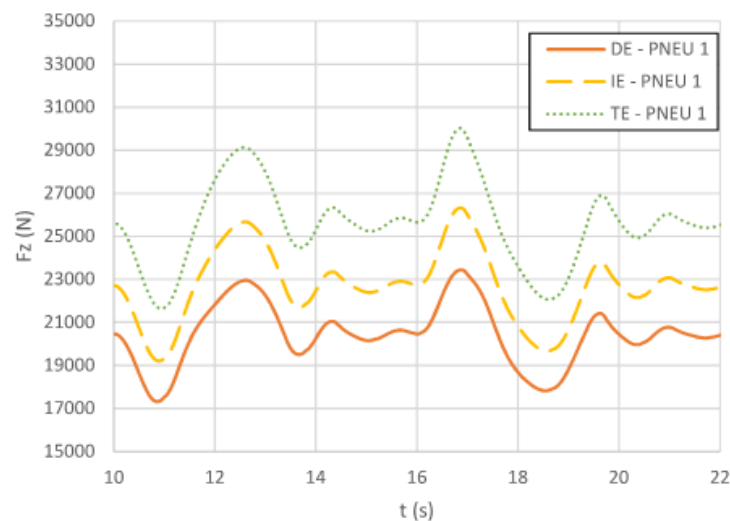


Figura 94 – Força vertical nas rodas esquerdas durante a manobra

As figuras 95 e 96 apresentam, respectivamente, a variação do ângulo de câmbor γ das rodas direitas e esquerdas durante a manobra. Verifica-se que o câmbor aumenta à medida que o peso sobre a roda aumenta, assim o gráfico de câmbor e de força vertical estão relacionados, possuindo perfil semelhante. São apresentados somente os resultados do pneu 1, tendo em vista que há muita proximidade entre os gráficos dos pneus 1, 2 e 3. Apesar disso, o gráfico do pneu 3 é o que apresenta menor amplitude de variação do câmbor, tendo em vista a menor aceleração produzida pelo pneu.

A figura 97 apresenta o ângulo de convergência ϵ durante a manobra. A convergência sofre alterações que são explicadas por uma combinação de dois efeitos: a transferência dinâmica de peso e o esterçamento das rodas na curva. As rodas do eixo traseiro são as que sofrem menor variação, por não esterçarem em uma curva.

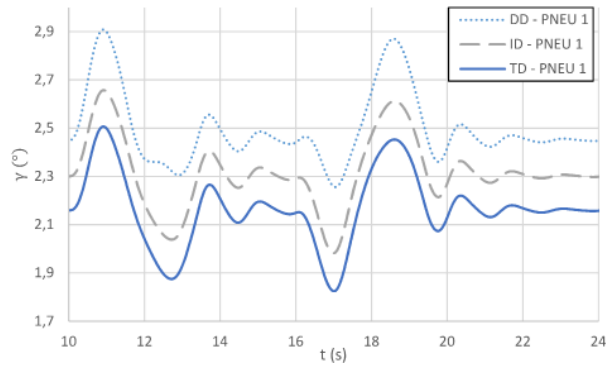


Figura 95 – Cãmber das rodas direitas durante a manobra

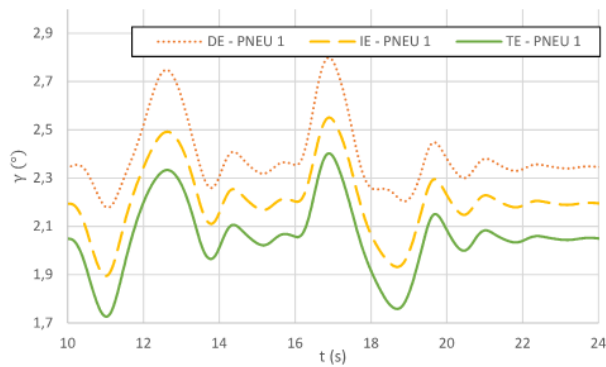


Figura 96 – Cãmber das rodas esquerdas durante a manobra

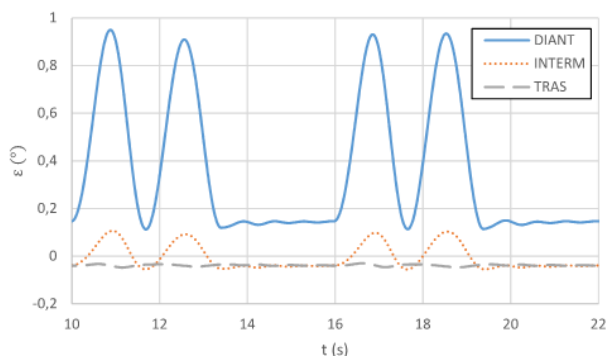


Figura 97 – Ângulo de convergência durante a manobra

4.4.2 Suspensões 2 e 3

Apresentam-se os resultados das simulações das suspensões 1, 2 e 3 para um mesmo tipo de pneu, executando uma manobra dupla evasiva. São analisadas a trajetória do veículo e variação dos ângulos de *pitch*, *roll* e orientação. É empregado o pneu 1 e a velocidade do veículo é de 28 km/h.

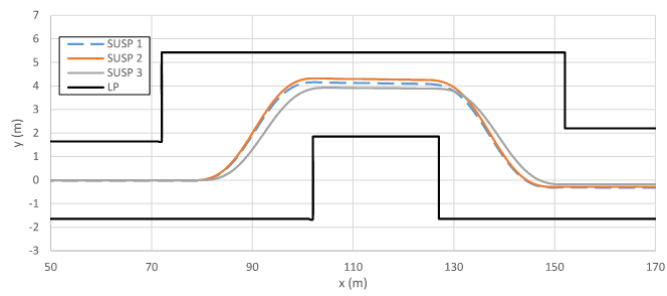


Figura 98 – Percurso do centro de gravidade do veículo

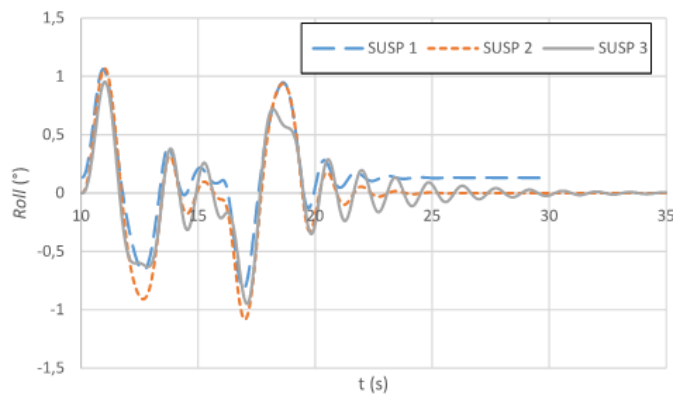


Figura 99 – Ângulo de *roll* durante a manobra

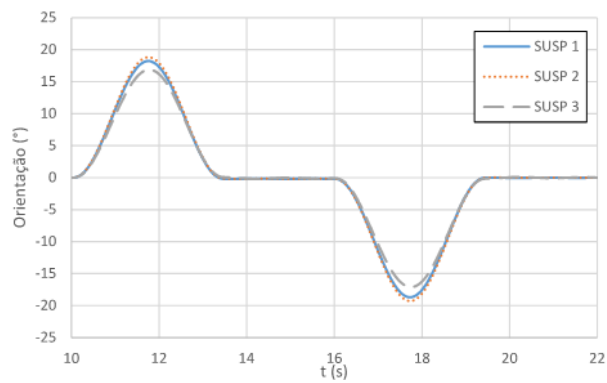


Figura 100 – Ângulo de orientação durante a manobra

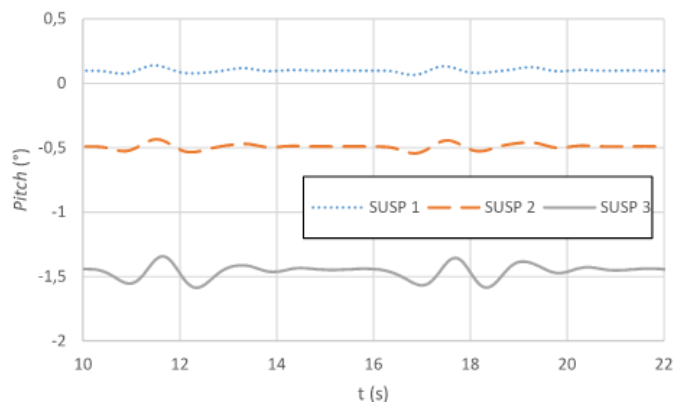


Figura 101 – Ângulo de *pitch* durante a manobra

5 COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES COM O TESTE DE CAMPO

As figuras 102 e 103 apresentam, respectivamente, a aceleração lateral e a taxa de *yaw* do veículo durante a execução da manobra, na simulação e no teste de campo, para a suspensão 1. As figuras 104 e 105 apresentam, respectivamente, a aceleração lateral e a taxa de *yaw* do veículo durante a execução da manobra, na simulação e no teste de campo, para a suspensão 2. As figuras 106 e 107 apresentam, respectivamente, a aceleração lateral e a taxa de *yaw* do veículo durante a execução da manobra, na simulação e no teste de campo, para a suspensão 3.

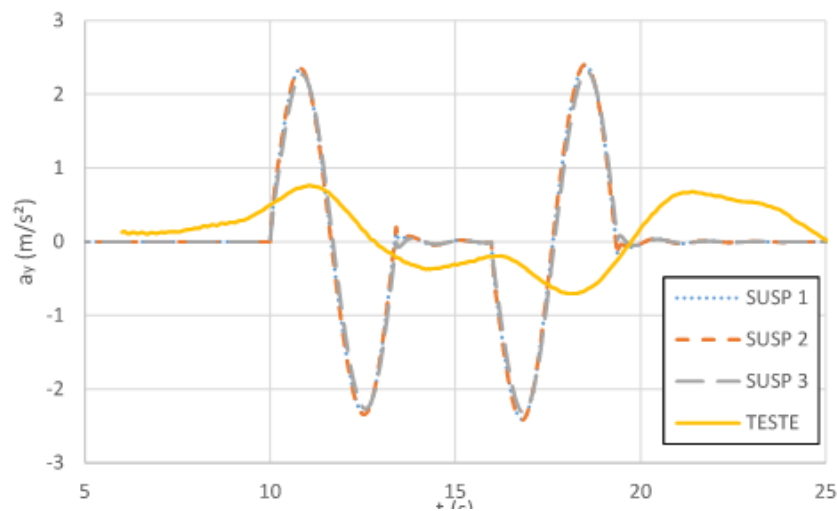


Figura 102 – Acel. lat. do veículo (suspensão 1)

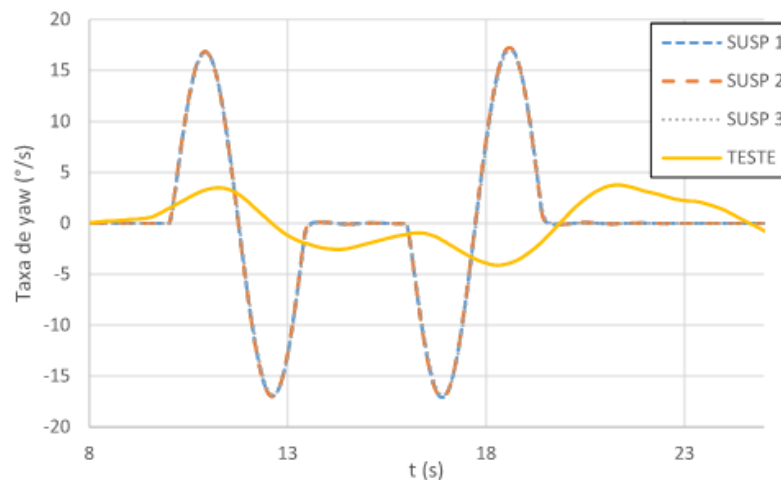


Figura 103 – Taxa de *yaw* do veículo (suspensão 1)

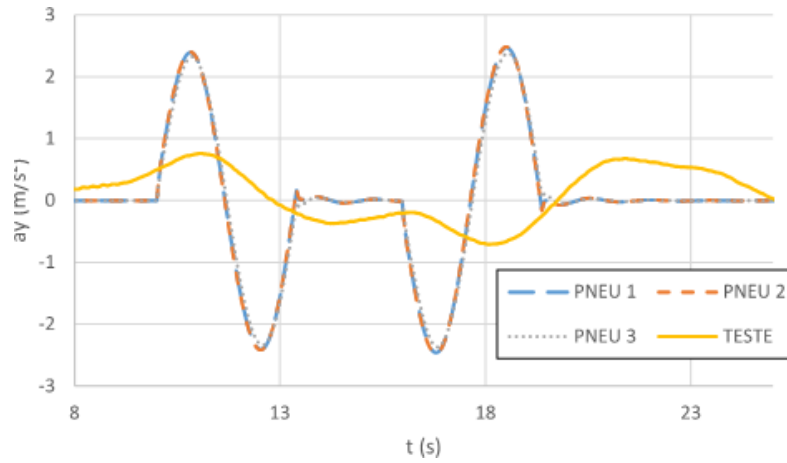


Figura 104 – Acel. lat. do veículo (suspensão 2)

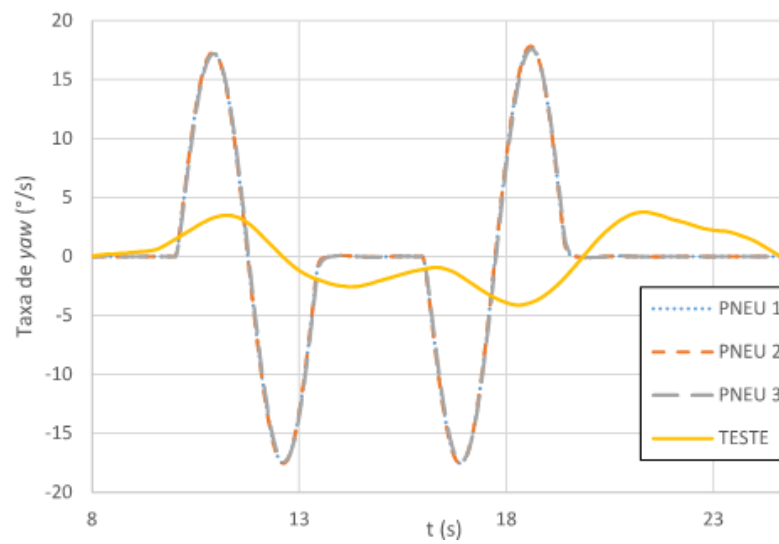


Figura 105 – Taxa de yaw do veículo (suspensão 2)

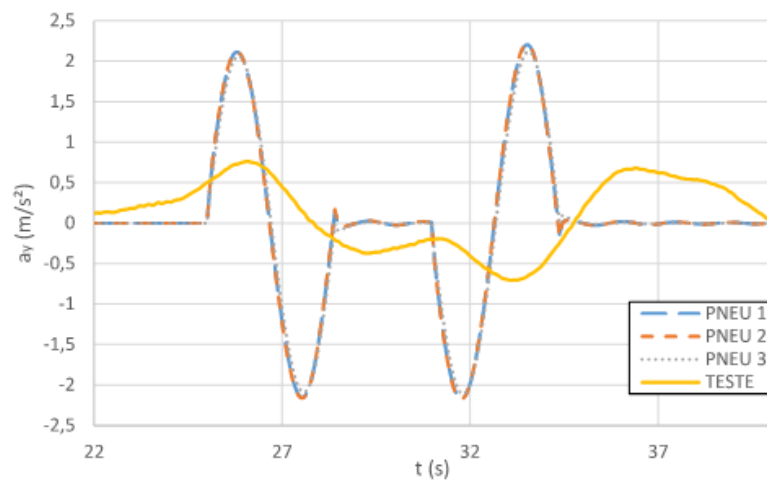


Figura 106 – Acel. lat. do veículo (suspensão 3)

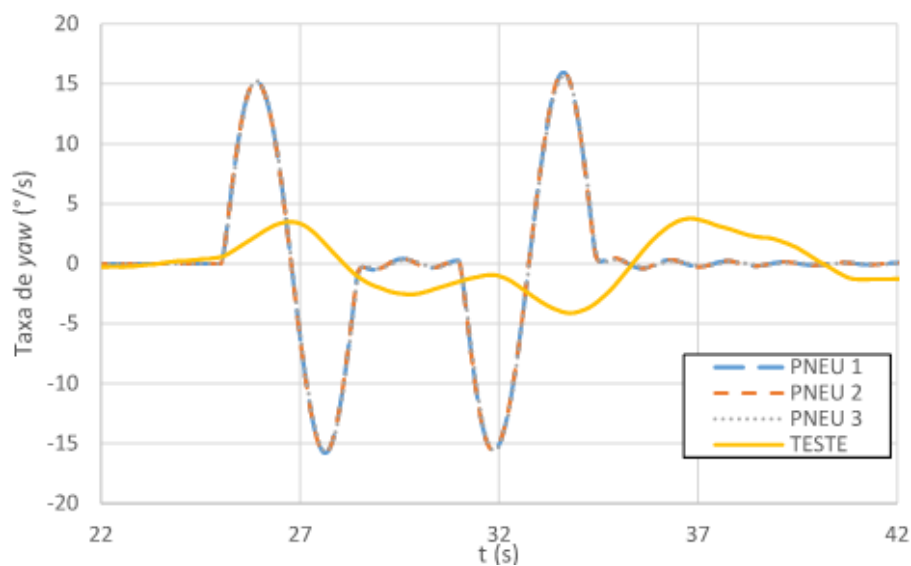


Figura 107 – Taxa de *yaw* do veículo (suspensão 3)

Pode-se observar, nas figuras 102 a 107, que os gráficos para pneus diferentes de uma mesma suspensão são muito próximos. Além disso, observa-se que o modelo de suspensão que mais se aproxima da curva do teste é o modelo proposto por Campos (10), observando que o distanciamento de sua curva da curva do teste é menor que as demais. Nas simulações realizadas, pode-se explicar a sua diferença entre os dados obtidos nas simulações e o teste por vários motivos, dentre os quais:

I) A adoção dos eixos principais de inércia coincidentes com os eixos coordenados no referencial do corpo. Esta hipótese altera os valores de momento de inércia do veículo e consequentemente os resultados calculados de sua performance direcional.

II) A aproximação do sistema de direção do Guarani para um sistema pinhão e cremalheira. Com um sistema de direção diferente, o esterçamento de cada roda é diferente, sendo também os esforços laterais de cada roda e o consequente comportamento dinâmico da viatura;

III) Considerar uma dependência linear entre o desvio angular do pneu e a força lateral;

Para que o modelo se aproxime da realidade, é necessário aprimorá-lo nos seguintes quesitos, que podem ser considerados em trabalhos futuros:

I) Buscar dados mais precisos de parâmetros do Guarani, como a posição de seu centro de gravidade e momentos de inércia;

II) Modelagem do sistema de direção real do guarani em substituição ao modelo de pinhão e cremalheira desenvolvido;

III) Utilizar um modelo de pneu mais aprimorado, que considere os efeitos de

deslizamento;

IV) Modelar uma suspensão não linear.

6 CONCLUSÃO

A redução do número de equações de movimento é um dos principais benefícios da modelagem por transformadores cinemáticos. Trabalhando com um conjunto de coordenadas mínimas, é possível equacionar o comportamento cinemático do mecanismo ao longo do tempo.

Outra vantagem da modelagem por transformadores cinemáticos é a viabilidade de considerar as não linearidades do sistema mecânico. Com isso, é possível analisar o esterçamento das rodas e os ângulos de geometria das suspensões, além do comportamento das peças da suspensão, não sendo possível em modelos mais simples como o massa-mola-amortecedor, linear.

Destaca-se também na modelagem por transformadores cinemáticos a modularidade, sendo possível a substituição/inserção de blocos de equações, conservando as demais equações do sistema. Com isso, pode-se comparar o desempenho do novo modelo desenvolvido com o antigo. Assim, é possível que se acrescente o conjunto das equações pertinentes ao eixo intermediário do veículo de forma modular, sem alterar significativamente o equacionamento geral, bastando inserir tais equações nas posições correlatas das matrizes jacobianas.

A desvantagem desse tipo de modelagem é o trabalho envolvido no seu equacionamento. As derivadas parciais de certas matrizes, calculadas simbolicamente, apresentam equações muito extensas e que não expõem claramente relações de causa e efeito.

Em relação aos resultados obtidos nas simulações do modelo computacional proposto, pode-se concluir que:

- a) O *cornering stiffness* interfere no comportamento direcional em uma manobra dupla evasiva. Quando baixo, reduz as acelerações angulares e aceleração lateral, reduzindo o desocamento lateral do veículo;
- b) O *cornering coefficient* maior aumenta as forças atuantes no veículo durante a manobra dupla evasiva, aumentando a variação dos ângulos de *pitch*, *roll* e *yaw*;
- c) Há uma dependência entre a posição vertical da roda e seu ângulo de câmber. No modelo apresentado, a elevação da posição da roda implica no aumento do ângulo de câmber. Esta variação depende da geometria da suspensão;
- d) O modelo desenvolvido apresenta comportamento subesterçante, comportamento verificado no cálculo do gradiente de subesterçamento e na trajetória percorrida pelo veículo ao percorrer uma trajetória circular em regime permanente.

A fim de aprimorar o modelo desenvolvido, dando prosseguimento a este trabalho,

as seguintes sugestões são fornecidas:

a) Poderá ser utilizado um modelo não linear de pneu, que é mais próximo da realidade, como o de Bakker-Pacejka ou de Julien;

b) Poderá ser modelado o sistema de direção do Guarani, em substituição ao modelo pinhão-cremalheira desenvolvido, podendo também incorporar uma malha de controle que simule o comportamento do motorista atuando de forma a percorrer uma trajetória pré-estabelecida;

c) Incorporar um modelo de trem de força ao modelo de veículo, contendo motor, embreagem, caixa de transmissão, diferencial e demais elementos do sistema de transmissão;

d) Incorporar um modelo de sistema de freios;

e) Introduzir mais um eixo, prevendo a dinâmica da VBR 8X8, viatura de quatro eixos do Projeto Estratégico Guarani e nova integrante da família de blindados do Exército Brasileiro.

Aprimorando o modelo desenvolvido, é possível desenvolver modelos mais fidedignos à realidade, que são submetidos a simulações que representam testes prescritos em normas, auxiliando no processo de desenvolvimento, teste e avaliação de veículos. De fato, a simulação permite a obtenção de parâmetros relevantes do desempenho veicular, prevendo o comportamento do veículo e propiciando a economia de tempo e recursos.

REFERÊNCIAS

- 1 NETO, R. T. da C. *Modelo de veículo tipo 4WS utilizando transformadores cinemáticos*. Mestrado em Engenharia Mecânica — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2001. 10 mar. de 2019. 9, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 39, 57, 64
- 2 JAZAR, R. N. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. Estados Unidos: Springer, 2009. 9, 40, 43, 44, 50, 62
- 3 VOROTOVIC, G. S.; RAKICEVIC, B. B.; MITIC, S.; STAMENKOVIC, D. D. Determination of cornering stiffness through integration of a mathematical model and real vehicle exploitation parameters. 2013. Disponível em: <https://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol41/1/08_gvorotovic.pdf>. 9, 39, 40, 41, 42
- 4 IVECO, V. de D. *Manual técnico Viatura Blindada Transporte de Pessoal VBTP-MR 6X6 "GUARANI": Uso e manutenção de 1º escalão*. [S.l.], 2015. 9, 44, 78
- 5 GODOY, R. Dados da suspensão guarani. Mensagem pessoal. 2019. 9, 45, 60
- 6 NEVES, M. R. R. *Análise da estabilidade lateral de um veículo tridimensional*. Mestrado em Engenharia Mecânica — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2002. 10 mar. de 2019. 9, 18, 19, 46, 64
- 7 PACEJKA, H. B.; BAKKER, E. The magic formula tyre model. In: *Proceedings 1st Tyre Colloquium*. [S.l.: s.n.], 1993. 18, 86
- 8 CHAGAS, C. F. de M. *Simulação da Vtr leve embarcada GE aerotransportada*. Mestrado em Engenharia Mecânica — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006. 10 mar. de 2019. 18, 19, 64, 73
- 9 NETO, R. T. da C. *Modelagem e integração dos mecanismos de suspensão e direção de veículos terrestres através do fluxo de potência*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. 18, 23
- 10 CAMPOS, C. G. *Análise da dinâmica vertical da viatura blindada de transporte de pessoal – média sobre rodas 6x6 Guarani*. Mestrado em Engenharia Mecânica — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013. 10 mar. de 2019. 19, 53, 55, 95
- 11 ENGENHARIA, M. *Modelagem e análises da Viatura Blindada para Transporte de Pessoal (VBTP)*. [S.l.], 2009. 19, 53
- 12 DOMPROBST. Heavy truck vehicle dynamics model & impact of the tire. *14th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology*, 2001. 10 de mar. de 2019. Disponível em: <<http://road-transport-technology.org/Proceedings/HVTT2014/Domprobst20-20Heavy20truck20vehicle20dynamics20model202620impact20o20the20tire.pdf>>. 19, 48
- 13 BABULAL, Y.; STALLMANN, M. J.; ELS, P. S. Parameterisation and modelling of large off-road tyres for handling analyses. 2015. 10 de fev. de 2020. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b80f/fccbb4250107fd6f6ee17376af4021b48ed8.pdf>>. 20, 48

- 14 NETO, R. T. da C.; GOIS, J. A. M. de; SARZETO, C. A. P. Vehicle model using kinematical transformers. In: *Proceedings of the IX DINAME*. [S.l.: s.n.], 2001. 21
- 15 HILLER, M.; KECSKEMÉTHY, A.; WOERNLE, C. A loop-based kinematical analysis of complex mechanisms. *ASME Transactions*, 1986. 10 de mar. de 2019. 23
- 16 HILLER, M.; WOERNLE, C. Proceedings of the international conference on robotics and automation. *ASME Transactions*, 1988. 10 de mar. de 2019. 23
- 17 HILLER, M.; KECSKEMÉTHY, A. Kinematics and dynamics of multibody mechanical systems. *Proceedings of CISM*, 1994. 10 de mar. de 2019. 23
- 18 GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. 1. ed. Estados Unidos: SAE International, 1992. 39, 86
- 19 GFYCAT. *Bump steer gif*. 2017. 10 fev. de 2020. Disponível em: <<https://images.app.goo.gl/TVavphyYT9RwkRQ77>>. 62
- 20 WIKIPEDIA. *Bump steer wikipedia gif*. 2017. 10 fev. de 2020. Disponível em: <<https://images.app.goo.gl/feAbnvNam797q6W49>>. 62
- 21 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 4130: Road vehicles – three dimensional reference system and fiducial marks – definitions*. Reino Unido, 1978. 2 p. 63, 67, 71
- 22 GENTA, G. *Motor vehicle dynamics – Modelling and simulation*. 1. ed. Singapore: World Scientific Publishing Company, 1997. 84
- 23 WONG, J. Y. *Theory of ground vehicles*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2001. 86

APÊNDICE A – PROGRAMA 1

Os apêndices deste trabalho têm por finalidade apresentar o programa desenvolvido em MATLAB® para a modelagem tridimensional do veículo de três eixos. O programa se divide em duas partes: o programa 1 apresentado no apêndice A, onde são declaradas as variáveis de entrada do programa, e o programa 2 apresentado no apêndice B, que executa os métodos dos transformadores cinemáticos e o princípio de D'Alembert para solucionar as equações cinemáticas e dinâmicas do problema.

```
%MODELO_TRIDIMENSIONAL_VEICULO_TRES_EIXOS
%PARAMETROS_VBTP_6X6_GUARANI
%DISSERTACAO_MESTRADO_IME_2020
%RAFAEL_VITOR_GUERRA_QUEIROZ
clc;
clear all;
close all;

% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DIREITA(DIMENSOES)
global jcfdd jcgdd jchdd jcmdd jbmdd fdmdd fbmdd demdd hbmdd hgmdd ro1dd ro2dd
clfdd
global clgdd clhdd clmdd f1dd f2dd f3dd g1dd g2dd g3dd h1dd h2dd h3dd Rodd Roodd
rrdd
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DIREITA(MASSA_E_INERCIA)
global m3dd m7dd T3ddem T7ddem
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DIREITA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global pdd badd clivredd ccompdd kmdd kbatsdd
global kbatidd rapddc
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA ESQUERDA(DIMENSOES)
global jcfde jcgde jchde jcmde jbmde fdmde fbmde demde hbmde hgmde ro1de ro2de clfde
global clgde clhde clmde f1de f2de f3de g1de g2de g3de h1de h2de h3de Rode Roode rrde
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA ESQUERDA(MASSA_E_INERCIA)
global m3de m7de T3decem T7decem
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA ESQUERDA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global pde bade clivrede ccompde kmde kbatsde
global kbatide rapdec
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA DIREITA(DIMENSOES)
global jcftd jcgtd jchtd jcmtd jbmtd fdmtd fbmtd demtd hbmt d hgmtd ro1td ro2td clftd
```

```
global clgtd clhtd clmtd f1td f2td f3td g1td g2td g3td h1td h2td h3td Rotd Rootd rrttd
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA DIREITA(MASSA_E_INERCIA)
global m3td m7td T3tdcm T7tdcm
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA DIREITA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global ptd batd clivretd ccomptd kmtd kbatstd
global kbatitd raptdc
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA ESQUERDA(DIMENSOES)
global jcfte jcgte jchte jcmte jbmte fdmte fbmte demte hbmte hgmte ro1te ro2te clfte
global clgte clhte clmte f1te f2te f3te g1te g2te g3te h1te h2te h3te Rote Roote rrtte
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA ESQUERDA(MASSA_E_INERCIA)
global m3te m7te T3tecm T7tecm
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA ESQUERDA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global pte bate clivrete ccompte kmte kbatste
global kbatite raptec
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA DIREITA(DIMENSOES)
global jcfstd jcgstd jchstd jcmstd jbmstd fdmstd fbmstd demstd hbmstd hgmsd ro1std
ro2std clfst
global clgstd clhstd clmstd f1std f2std f3std g1std g2std g3std h1std h2std h3std Rotd
Rootd rrttd
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA DIREITA(MASSA_E_INERCIA)
global m3std m7std T3stdcm T7stdcm
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA DIREITA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global pstd batstd clivretstd ccomptstd kmstd kbatstd
global kbatistd rapstdc
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA ESQUERDA(DIMENSOES)
global jcfste jcgste jchste jcmste jbmste fdmste fbmste demste hbmste hgmste ro1ste ro2ste
clfste
global clgste clhste clmste f1ste f2ste f3ste g1ste g2ste g3ste h1ste h2ste h3ste Rotte Roote
rrtte
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA ESQUERDA(MASSA_E_INERCIA)
global m3ste m7ste T3stecm T7stecm
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA ESQUERDA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global pste batte clivrette ccomptte kmste kbatstte
global kbatistte rapsttec
%TEMPO_MANOBRA
global dt
%ANGULO DE CAMBER
global camberdd camberde cambertd camberte camberttd cambertte
% VARIÁVEIS DOS PNEUS
```

```
global rroda hp kp kbatp rpneu
% VARIÁVEIS DO SISTEMA DE DIREÇÃO
global coefest
%RAZAO_ESTERÇAMENTO_EIXO_INTERMEDIARIO_E_DIANTEIRO
global angvol1 angvol2 angvol3 angvol4
%ANGULO_VOLANTE_CADA_MANOBRA_LANE_CHANGE
% VARIÁVEIS DO CHASSIS
global uc mc Tccm g
%VARIABLES_PARA_PLOTAGEM_DOS_GRAFICOS
global flatplot flatplot2 flatplot3 flatplot4 flatplot5 flatplot6
%PLOTAR_FORÇA_LAT
global yaccelplot
%PLOTAR_ACEL_LAT
global deltaddvet deltadevet deltatdvet deltatevet deltattddvet deltattdevet
%PLOTAR_DELTA_RODA
global iter
%NUMERO_ITERACOES
global vetqvol
%PLOTAR_ANGULO_VOLANTE
global timeplot
%PLOTAR_TEMPO
global yawrate pitchrate rollrate
%PLOTAR_VEL_ANGULAR
global convde convte convtte
%PLOTAR_ANGULO_CONVERGENCIA
global fvertdd fvertde fverttd fvertte fverttdd fverttte
%PLOTAR_FORÇA_VERTICAL
global b1plotdd b2plotdd b3plotdd b4plotdd b5plotdd b9plotdd b10plotdd
%PLOTAR_COORDENADA_RELATIVA_DD
global b1plotde b2plotde b3plotde b4plotde b5plotde b9plotde b10plotde
%PLOTAR_COORDENADA_RELATIVA_DE
global b1plottd b2plottd b3plottd b4plottd b5plottd b9plottd b10plottd
%PLOTAR_COORDENADA_RELATIVA_ID
global b1plotte b2plotte b3plotte b4plotte b5plotte b9plotte b10plotte
%PLOTAR_COORDENADA_RELATIVA_IE
global b1plottdd b2plottdd b3plottdd b4plottdd b5plottdd b9plottdd b10plottdd
%PLOTAR_COORDENADA_RELATIVA_TD
global b1plottte b2plottte b3plottte b4plottte b5plottte b9plottte b10plottte
%PLOTAR_COORDENADA_RELATIVA_TE
```



```
global defdd defde deftd defte defttdd defttte
%deformação na mola
global xpddi ypddi xpdei ypdei xptdi yptdi xppei yppei xpttddi ypttddi xptpei yptpei
%CORNERING_COEFFICIENT
global CC_alfa
%VARIAVEIS_PARA_ESCOLHA_DA_SIMULAÇÃO
global escolhapneu escolhasusp escolhateste
%FINAL_VARIAVEIS_GLOBAIS

%LEGENDA-
%DD-DIANTEIRA_DIREITA
%DE-DIANTEIRA_ESQUERDA
%TD-INTERMEDIARIA_DIREITA
%TE-INTERMEDIARIA_ESQUERDA
%TTD-TRASEIRA_DIREITA
%TTE-TRASEIRA_ESQUERDA

%ESCOLHA DO PNEU
%1 = Michelin 16.00R20 XZL
%2 = Michelin 315/70 R22.5 XZE2+154/150L
%3 = Michelin 11.00R22.5 XZE2+ 148/145L
escolhapneu = 1;

%ESCOLHA DA SUSPENSÃO
%1 = Pedroso, rigidez constante e amortecimento variavel
%2 = Pedroso, rigidez e amortecimento variaveis
%3 = Campos, multiplicador da curva de rigidez
escolhasusp = 3;

%ESCOLHA DA MANOBRA
%1 = Submetido somente ao próprio peso
%2 = Trajetória circular em regime permanente
%3 = Manobra dupla evasiva
escolhateste = 3;

if(escolhapneu == 1)%1 = Michelin 16.00R20 XZL
CC_alfa=5600.5/(3905*9.8);
hp=0.417;
rroda=0.254;
```

```
rpneu=rroda+hp;
kp=1250000;
kbatp=12500000;%BATENTE
end

if(escolhapneu == 2)%2 = Michelin 315/70 R22.5 XZE2+154/150L
CC_alfa=3000/(2000*9.8);
hp=0.22;
rroda=0.286;
rpneu=rroda+hp;
kp=1250000;
kbatp=12500000;%BATENTE
end

if(escolhapneu == 3)%3 = Michelin 11.00R22.5 XZE2+ 148/145L
CC_alfa=2200/(2000*9.8);
hp=0.278;
rroda=0.286;
rpneu=rroda+hp;
kp=1250000;
kbatp=12500000;%BATENTE
end

if( escolhateste == 1)
tsim =10;%tempo de simulação
if(escolhasusp == 3)
tsim=25;% tempo de simulação
end
end

if(escolhateste == 2)
tsim=150;% tempo de simulação
end

if(escolhateste == 3)
if(escolhasusp == 1)
tsim=30;
end
if(escolhasusp == 2)
```

```
tsim=30;
end
if(escolhasusp == 3)
tsim=50;
end
end

angvolgeral=45;

%ANGULO_MAXIMO_ESTERCAMENTO_VOLANTE
uc=28;

% velocidade longitudinal (km/h)
uc=uc/3.6;
angvol1=angvolgeral;
angvol2=angvolgeral;
angvol3=angvolgeral;
angvol4=angvolgeral;
coefest=0.4;
dt=1.7;

%ALGUNS PARAMETROS DE SUSPENSAO
pdd=1.15;
clivredd=0.26;% comprimento livre da mola (m)
ccompdd=0.250;% Comprimento da mola comprimida no curso máximo da suspensão (m)
kbatsdd=3000000;% constante de elasticidade do batente superior (N/m)
kbatidd=3000000;% constante de elasticidade do batente inferior (N/m)

pde=1.15;
clivrede=0.26;% comprimento livre da mola (m)
ccompde=0.250;% Comprimento da mola comprimida no curso máximo da suspensão (m)
kbatsde=3000000;% constante de elasticidade do batente superior (N/m)
kbatide=3000000;% constante de elasticidade do batente inferior (N/m)

ptd=1.15;
clivretd=0.26;% comprimento livre da mola (m)
ccomptd=0.250;% Comprimento da mola comprimida no curso máximo da suspensão(m)
kbatstd=3000000;% constante de elasticidade do batente superior (N/m)
kbatitd=3000000;% constante de elasticidade do batente inferior (N/m)
```

```
pte=1.15;
clivrete=0.26;% comprimento livre da mola (m)
ccompte=0.250;% Comprimento da mola comprimida no curso máximo da suspensão (m)
kbatste=3000000;% constante de elasticidade do batente superior (N/m)
kbatite=3000000;% constante de elasticidade do batente inferior (N/m)

pttd=1.15;
clivrettd=0.26;% comprimento livre da mola (m)
ccompttd=0.250;% Comprimento da mola comprimida no curso máximo da suspensão(m)
kbatsttd=3000000;% constante de elasticidade do batente superior (N/m)
kbatitttd=3000000;% constante de elasticidade do batente inferior (N/m)

ptte=1.15;
clivrette=0.26;% comprimento livre da mola (m)
ccomptte=0.250;% Comprimento da mola comprimida no curso máximo da suspensão (m)
kbatstte=3000000;% constante de elasticidade do batente superior (N/m)
kbatittte=3000000;% constante de elasticidade do batente inferior (N/m)

%CHASSI
g=9.81;

% aceleração da gravidade (m/s2)
mc=12588;

%MASSA_CHASSI
jcx=11914.5;

%MOM_INERCIA_XX
jcy=52729.5;

%MOM_INERCIA_YY
jcz=63595.436;

%MOM_INERCIA_ZZ
Tccm=[jcz 0 0;
0 jcy 0;
0 0 jcx];
```

```

%TENSOR_INERCIA
%SUSPENSAO_DIANTEIRA_DIREITA
casterdd=3;%graus
jcfdd=(294.5+669.5)*tan(casterdd*pi/180)*10 ^ -3;
jcgdd=(832-411.5)*10^-3;
jchdd=(294.5+669.5)*10^-3;
jcmdd=sqrt(jcfdd^2+jcgdd^2+jchdd^2);
jbmdd=0.74;
fdmdd=0.34;
fbmdd=0.39;%HF+HB
demdd=0.8;
hbmdd=0.2;
hgmdd=0.31/2;
clfdd=0.68;
clgdd=-0.832;
clhdd=-0.6695;
clmdd=sqrt(clfdd^2+clgdd^2+clhdd^2);

% Determinação dos vetores f, g e h no referencial (XYZ)c
Add=[0.267492+1.7-0.730/2;
-0.4115+0.04;
-0.495-0.2495];
Odd=[0.267492+1.7+0.730/2;
-0.4115;
-0.499-0.2495];
OAdd=Add-Odd;
OAmdd=sqrt((OAdd(1))^2+(OAdd(2))^2+(OAdd(3))^2);
f1dd=(OAdd(1))/OAmdd;
f2dd=(OAdd(2))/OAmdd;
f3dd=(OAdd(3))/OAmdd;
auxg1dd=-f2dd;
auxg2dd=f1dd;
auxg3dd=0;
auxgmdd=sqrt(auxg1dd^2+auxg2dd^2+auxg3dd^2);
g1dd=auxg1dd/auxgmdd;
g2dd=auxg2dd/auxgmdd;
g3dd=auxg3dd/auxgmdd;
auxh1dd=-f1dd*f3dd;
auxh2dd=-f2dd*f3dd;

```

```

auxh3dd=f1dd^2+f2dd^2;
auxhmdd=sqrt(auxh1dd^2+auxh2dd^2+auxh3dd^2);
h1dd=auxh1dd/auxhmdd;
h2dd=auxh2dd/auxhmdd;
h3dd=auxh3dd/auxhmdd;
Rodd=[f1dd g1dd h1dd;
f2dd g2dd h2dd;
f3dd g3dd h3dd];% Matriz transformação do referencial (fgh) para o (XYZ)c
Roodd=[Rodd zeros(3) zeros(3) zeros(3) % matriz diagonal em blocos de Ro
zeros(3) Rodd zeros(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) Rodd zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3) Rodd];
rrdd=(Add+Odd)/2;% vetor posição da origem do referencial (fgh) em relação ao referen-
cial (XYZ)c
rapddc=rrdd+Rodd*[jcfdd;jcgdd;jchdd];
ro1dd=3.0044;% (graus)%Primeiro angulo da ponteira: rotação em h'''
ro1dd=ro1dd*pi/180;
ro2dd=344.7876;%Segundo angulo da ponteira: rotação em torno de f''''
ro2dd=ro2dd*pi/180;
% Dados de entrada das massas e momentos de inércia dos corpos em relação aos seus
C.M.
m3dd=50;% massa do corpo 3 - manga do eixo + telescópico inferior (kg)
j3ddxx=1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j3ddyy=2;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j3ddzz=2;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T3ddcm=[j3ddxx 0 0;0 j3ddyy 0;0 0 j3ddzz];% tensor de inércia do corpo 3
m7dd=190;% massa do corpo 7 - roda + pneu (kg)
j7ddxx=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j7ddyy=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j7ddzz=33.8;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T7ddcm=[j7ddxx 0 0;0 j7ddyy 0;0 0 j7ddzz];% tensor de inércia do corpo 7

%SUSPENSAO_DIANTEIRA_ESQUERDA
casterde=3;%graus
jcfde=(294.5+669.5)*tan(casterde*pi/180)*10^-3;
jcgde=-(832-411.5)*10^-3;
jchde=(294.5+669.5)*10^-3;
jcmde=sqrt(jcfde^2+jcgde^2+jchde^2);
jbmde=0.74;

```

```

fdmde=0.34;
fbmde=0.39;
demde=0.8;
hbmde=0.2;
hgmde=0.31/2;
clfde=0.68;
clgde=0.832;
clhde=-0.6695;
clmde=sqrt(clfde^2+clgde^2+clhde^2);
% Determinação dos vetores f, g e h no referencial (XYZ)c
Ade=[0.267492+1.7-0.730/2;
0.4115-0.04;
-0.495-0.2495];
Ode=[0.267492+1.7+0.730/2;
0.4115;
-0.499-0.2495];
OAde=Ade-Ode;
OAmde=sqrt((OAde(1))^2+(OAde(2))^2+(OAde(3))^2);
f1de=(OAde(1))/OAmde;
f2de=(OAde(2))/OAmde;
f3de=(OAde(3))/OAmde;
auxg1de=-f2de;
auxg2de=f1de;
auxg3de=0;
auxgmde=sqrt(auxg1de^2+auxg2de^2+auxg3de^2);
g1de=auxg1de/auxgmde;
g2de=auxg2de/auxgmde;
g3de=auxg3de/auxgmde;
auxh1de=-f1de*f3de;
auxh2de=-f2de*f3de;
auxh3de=f1de^2+f2de^2;
auxhmde=sqrt(auxh1de^2+auxh2de^2+auxh3de^2);
h1de=auxh1de/auxhmde;
h2de=auxh2de/auxhmde;
h3de=auxh3de/auxhmde;
Rode=[f1de g1de h1de;
f2de g2de h2de;
f3de g3de h3de];
% Matriz transformação do referencial (fgh) para o (XYZ)c

```

```

Roode=[Rode zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) Rode zeros(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) Rode zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3) Rode];
rrde=(Ade+Ode)/2;
% vetor posição da origem do referencial (fgh) em relação ao referencial (XYZ)c
rapdec=rrde+Rode*[jcfde;jcgde;jchde];
% posição do ponto de apoio do amortecedor no referencial (xyz)c
ro1de=-3.0044;
ro1de=ro1de*pi/180;
ro2de=(344.7876);
ro2de=ro2de*pi/180;
m3de=50;% massa do corpo 3 - manga do eixo + telescópico inferior (kg)
j3dexx=1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j3deyy=2;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j3dezz=2;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T3decM=[j3dexx 0 0;
0 j3deyy 0;
0 0 j3dezz];
m7de=190;% massa do corpo 7 - roda + pneu (kg)
j7dexx=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j7deyy=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j7dezz=33.8;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T7decM=[j7dexx 0 0;
0 j7deyy 0;
0 0 j7dezz];

%SUSPENSAO_INTERMEDIARIA_DIREITA
castertd=1.5;
jcftd=(294.5+669.5)*tan(castertd*pi/180)*10^-3;
jcgtd=(832-411.5)*10^-3;
jchtd=(294.5+669.5)*10^-3;
jcmtd=sqrt(jcftd^2+jcgtd^2+jchtd^2);
jbmtd=0.74;
fdmtd=0.34;
fbmtd=0.39;
demtd=0.8;
hbmtd=0.2;
hgmtd=0.31/2;

```



```

clftd=0.68;
clgtd=-0.832;
clhtd=-0.6695;
clmtd=sqrt(clftd^2+clgtd^2+clhtd^2);
% determinação dos vetores f, g e h no referencial (XYZ)c
Otd=[0.267492+0.73/2;
-0.4115;
-0.499-0.2495];
Atd=[0.267492-0.73/2;
-0.4115+0.04;
-0.495-0.2495];
OAtd=Atd-Otd;
OAmtd=sqrt((OAtd(1))^2+(OAtd(2))^2+(OAtd(3))^2);
f1td=(OAtd(1))/OAmtd;
f2td=(OAtd(2))/OAmtd;
f3td=(OAtd(3))/OAmtd;
auxg1td=-f2td;
auxg2td=f1td;
auxg3td=0;
auxgmd=sqrt(auxg1td^2+auxg2td^2+auxg3td^2);
g1td=auxg1td/auxgmd;
g2td=auxg2td/auxgmd;
g3td=auxg3td/auxgmd;
auxh1td=-f1td*f3td;
auxh2td=-f2td*f3td;
auxh3td=f1td^2+f2td^2;
auxhmd=sqrt(auxh1td^2+auxh2td^2+auxh3td^2);
h1td=auxh1td/auxhmd;
h2td=auxh2td/auxhmd;
h3td=auxh3td/auxhmd;
Rotd=[f1td g1td h1td;
f2td g2td h2td;
f3td g3td h3td];
% Matriz transformação do referencial (fgh) para o (XYZ)c
Rootd=[Rotd zeros(3) zeros(3) zeros(3)
Ro zeros(3) Rotd zeros(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) Rotd zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3) Rotd];
rrtd=(Atd+Otd)/2;

```

```

% vetor posição da origem do referencial (fgh) em relação ao referencial (XYZ)c
raptdc=rrtd+Rotd*[jcftd;jcgtd;jchtd];
% posição do ponto de apoio do amortecedor no referencial (xyz)c
ro1td=3.0044;
ro1td=ro1td*pi/180;
ro2td=(360-15.2124);
ro2td=ro2td*pi/180;
% Dados de entrada das massas e momentos de inércia dos corpos em relação aos seus
C.M.
m3td=50;% massa do corpo 3 - manga do eixo + telescópico inferior (kg)
j3tdxx=1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j3tdyy=2;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j3tdzz=2;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T3tdcm=[j3tdxx 0 0;
0 j3tdyy 0;
0 0 j3tdzz];
m7td=190;% massa do corpo 7 - roda + pneu (kg)
j7tdxx=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j7tdyy=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j7tdzz=33.8;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T7tdcm=[j7tdxx 0 0;
0 j7tdyy 0;
0 0 j7tdzz];

%SUSPENSÃO_INTERMEDIARIA_ESQUERDA
casterte=1.5;
jcfte=(294.5+669.5)*tan(casterte*pi/180)*10^-3;
jcgte=-(832-411.5)*10^-3;
jchte=(294.5+669.5)*10^-3;
jcmte=sqrt(jcfte^2+jcgte^2+jchte^2);
jbmte=0.74;
fdmte=0.34;
fbmte=0.39;
demte=0.8;
hbmte=0.2;
hgmte=0.31/2;
clfte=0.68;
clgte=0.832;
clhte=-0.6695;

```

```

clmte=sqrt(clfte^2+clgte^2+clhte^2);
Ote=[0.267492+0.73/2;
0.4115;
-0.499-0.2495];
Ate=[0.267492-0.73/2;
0.4115-0.04;
-0.495-0.2495];
OAte=Ate-Ote;
OAmte=sqrt((OAte(1))^2+(OAte(2))^2+(OAte(3))^2);
f1te=(OAte(1))/OAmte;
f2te=(OAte(2))/OAmte;
f3te=(OAte(3))/OAmte;
auxg1te=-f2te;
auxg2te=f1te;
auxg3te=0;
auxgmte=sqrt(auxg1te^2+auxg2te^2+auxg3te^2);
g1te=auxg1te/auxgmte;
g2te=auxg2te/auxgmte;
g3te=auxg3te/auxgmte;
auxh1te=-f1te*f3te;
auxh2te=-f2te*f3te;
auxh3te=f1te^2+f2te^2;
auxhmte=sqrt(auxh1te^2+auxh2te^2+auxh3te^2);
h1te=auxh1te/auxhmte;
h2te=auxh2te/auxhmte;
h3te=auxh3te/auxhmte;
Rote=[f1te g1te h1te;
f2te g2te h2te;
f3te g3te h3te];
% Matriz transformação do referencial (fgh) para o (XYZ)c
Roote=[Rote zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) Rote zeros(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) Rote zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3) Rote];
rrte=(Ote+Ate)/2;
raptec=rrte+Rote*[jcfte;jcgte;jchte];
ro1te=-3.0044;
ro1te=ro1te*pi/180;
ro2te=(360-15.2124);

```

```

ro2te=ro2te*pi/180;
% Dados de entrada das massas e momentos de inércia dos corpos em relação aos seus
C.M.
m3te=50;% massa do corpo 3 - manga do eixo + telescópico inferior (kg)
j3texx=1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j3teyy=2;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j3tezz=2;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T3tecm=[j3texx 0 0;
0 j3teyy 0;
0 0 j3tezz];% tensor de inércia do corpo 3
m7te=190;% massa do corpo 7 - roda + pneu (kg)
j7texx=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j7teyy=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j7tezz=33.8;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T7tecm=[j7texx 0 0;
0 j7teyy 0;
0 0 j7tezz];% tensor de inércia do corpo 7

% SUSPENSÃO_TRASEIRA_DIREITA
casterstd=0;
jcfttd=(294.5+669.5)*tan(casterstd*pi/180)*10^-3;
jcgstd=-(832-411.5)*10^-3;
jchstd=(294.5+669.5)*10^-3;
jcmstd=sqrt(jcfttd^2+jcgstd^2+jchstd^2);
jbmstd=0.74;
fdmstd=0.34;
fbmstd=0.39;
demstd=0.8;
hbmstd=0.2;
hgmstd=0.31/2;
clfttd=0.68;
clgstd=0.832;
clhstd=-0.6695;
clmstd=sqrt(clfttd^2+clgstd^2+clhstd^2);
Ostd=[0.267492-2+0.73/2;
-0.4115;
-0.499-0.2495];
Astd=[0.267492-2-0.73/2;
-0.4115-0.04;

```

```

-0.495-0.2495];
AOttd=Otttd-Atttd;
AOmttd=sqrt((AOttd(1))^2+(AOttd(2))^2+(AOttd(3))^2);
f1ttd=(AOttd(1))/AOmttd;
f2ttd=(AOttd(2))/AOmttd;
f3ttd=(AOttd(3))/AOmttd;
auxg1ttd=-f2ttd;
auxg2ttd=f1ttd;
auxg3ttd=0;
auxgmttd=sqrt(auxg1ttd^2+auxg2ttd^2+auxg3ttd^2);
g1ttd=auxg1ttd/auxgmttd;
g2ttd=auxg2ttd/auxgmttd;
g3ttd=auxg3ttd/auxgmttd;
auxh1ttd=-f1ttd*f3ttd;
auxh2ttd=-f2ttd*f3ttd;
auxh3ttd=f1ttd^2+f2ttd^2;
auxhmttd=sqrt(auxh1ttd^2+auxh2ttd^2+auxh3ttd^2);
h1ttd=auxh1ttd/auxhmttd;
h2ttd=auxh2ttd/auxhmttd;
h3ttd=auxh3ttd/auxhmttd;
Rottd=[f1ttd g1ttd h1ttd;
f2ttd g2ttd h2ttd;
f3ttd g3ttd h3ttd];
Roottd=[Rottd zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) Rottd zeros(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) Rottd zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3) Rottd];
rrttd=(Otttd+Atttd)/2;
raptttdc=rrttd+Rottd*[jcfcttd;jcgcttd;jchcttd];
ro1ttd=-3.0044;
ro1ttd=ro1ttd*pi/180;
ro2ttd=(360-15.2124);
ro2ttd=ro2ttd*pi/180;
% Dados de entrada das massas e momentos de inércia dos corpos em relação aos seus
C.M.
m3ttd=50;% massa do corpo 3 - manga do eixo + telescópico inferior (kg)
j3ttdxx=1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j3ttdyy=2;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j3ttdzz=2;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)

```

```

T3ttddcm=[j3ttddxx 0 0;
0 j3ttddyy 0;
0 0 j3ttddzz];
m7ttdd=190;% massa do corpo 7 - roda + pneu (kg)
j7ttddxx=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j7ttddyy=19.1;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j7ttddzz=33.8;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T7ttddcm=[j7ttddxx 0 0;
0 j7ttddyy 0;
0 0 j7ttddzz];

% SUSPENSÃO_TRASEIRA_ESQUERDA
castertte=0;
jcfte=(294.5+669.5)*tan(castertte*pi/180)*10^-3;
jcgte=(832-411.5)*10^-3;
jchte=(294.5+669.5)*10^-3;
jcmte=sqrt(jcfte^2+jcgte^2+jchte^2);
jbmtte=0.74;
fdmtte=0.34;
fbmtte=0.39;
demtte=0.8;
hbmtte=0.2;
hgmtte=0.31/2;
clfte=0.68;
clgte=-0.832;
clhte=-0.6695;
clmte=sqrt(clfte^2+clgte^2+clhte^2);
% Determinação dos vetores f, g e h no referencial (XYZ)c
Otte=[0.267492-2+0.73/2;
0.4115;
-0.499-0.2495];
Atte=[0.267492-2-0.73/2;
0.4115+0.04;
-0.495-0.2495];
AOtte=Otte-Atte;
AOmte=sqrt((AOtte(1))^2+(AOtte(2))^2+(AOtte(3))^2);
f1tte=(AOtte(1))/AOmte;
f2tte=(AOtte(2))/AOmte;
f3tte=(AOtte(3))/AOmte;

```

```

auxg1tte=-f2tte;
auxg2tte=f1tte;
auxg3tte=0;
auxgmtte=sqrt(auxg1tte^2+auxg2tte^2+auxg3tte^2);
g1tte=auxg1tte/auxgmtte;
g2tte=auxg2tte/auxgmtte;
g3tte=auxg3tte/auxgmtte;
auxh1tte=-f1tte*f3tte;
auxh2tte=-f2tte*f3tte;
auxh3tte=f1tte^2+f2tte^2;
auxhmtte=sqrt(auxh1tte^2+auxh2tte^2+auxh3tte^2);
h1tte=auxh1tte/auxhmtte;
h2tte=auxh2tte/auxhmtte;
h3tte=auxh3tte/auxhmtte;
Rotte=[f1tte g1tte h1tte;
f2tte g2tte h2tte;
f3tte g3tte h3tte];
% Matriz transformação do referencial (fgh) para o (XYZ)c
Rootte=[Rotte zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) Rotte zeros(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) Rotte zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3) Rotte];
rrtte=(Otte+Atte)/2;
rapttec=rrtte+Rotte*[jcftte;jcgtte;jchtte];
ro1tte=3.0044;
ro1tte=ro1tte*pi/180;
ro2tte=(360-15.2124);
ro2tte=ro2tte*pi/180;
% Dados de entrada das massas e momentos de inércia dos corpos em relação aos seus
C.M.
m3tte=50;% massa do corpo 3 - manga do eixo + ttelescópico inferior (kg)
j3ttexx=1;% momento de inércia em relação ao eixo x (kg.m2)
j3ttteyy=2;% momento de inércia em relação ao eixo y (kg.m2)
j3tttezz=2;% momento de inércia em relação ao eixo z (kg.m2)
T3tttecm=[j3ttexx 0 0;
0 j3ttteyy 0;
0 0 j3tttezz];
% tensor de inércia do corpo 3
m7tte=190;% massa do corpo 7 - roda + pneu (kg)

```



```

q51=y(1:n,17);
q2=y(1:n,8);
q12=y(1:n,10);
q22=y(1:n,12);
q32=y(1:n,14);
q42=y(1:n,16);
q52=y(1:n,18);
q1=q1*180/pi;
q11=q11*180/pi;
q21=q21*180/pi;
q31=q31*180/pi;
q41=q41*180/pi;
q51=q51*180/pi;
camberdd=camberdd*180/pi;
camberde=camberde*180/pi;
cambertd=cambertd*180/pi;
camberte=camberte*180/pi;
camberttd=camberttd*180/pi;
cambertte=cambertte*180/pi;
qd=qd*180/pi;
qp=qp*180/pi;
qr=qr*180/pi;
yawrate=180/pi*y(1:n,22);
pitchrate=180/pi*y(1:n,23);
rollrate=180/pi*y(1:n,24);
% Pista para "double-lane change"
uc = 60;%A pista para vel de 60 km/h
lv=2.770;% largura do veículo (m)
% Reta 1
y1=linspace(0,(30+(6.0*uc)),500);
x1=(1.1*lv+0.25)/2;
% Reta 2
y2=linspace(0,(6.0*uc),500);
x2=(-(1.1*lv+0.25)/2);
% Reta 3
x3=linspace((((1.1*lv+0.25)/2)-3.5),((1.1*lv+0.25)/2),500);
y3=(30+(6.0*uc));
% Reta 4
x4=linspace((((1.1*lv+0.25)/2)-3.5-(1.2*lv+0.25)),(-(1.1*lv+0.25)/2),500);

```

```
y4=6.0*uc;
% Reta 5
y5=linspace((30+6.0*uc),((30+6.0*uc)+25),500);
x5=(((1.1*lv+0.25)/2)-3.5);
% Reta 6
y6=linspace((6.0*uc),((6.0*uc)+80),500);
x6=(((1.1*lv+0.25)/2)-3.5-(1.2*lv+0.25));
% Reta 7
x7=linspace((((1.1*lv+0.25)/2)-3.5),((1.1*lv+0.25)/2),500);
y7=30+(6.0*uc)+25;
% Reta 8
x8=linspace((((1.1*lv+0.25)/2)-3.5-(1.2*lv+0.25)),((1.1*lv+0.25)/2)-(1.3*lv+0.25),500);
y8=((6.0*uc)+80);
% Reta 9
y9=linspace((30+(6.0*uc)+25),((30+6.0*uc)+25+55),500);
x9=(1.1*lv+0.25)/2;
% Reta 10
y10=linspace(((6.0*uc)+80),((6.0*uc)+80+30),500);
x10=(((1.1*lv+0.25)/2)-(1.3*lv+0.25));
%GRAFICOS
figure(1);
plot(t,qx(:));
title('X CG');
figure(2);
plot(t,qy(:));
title('Y CG');
figure(3);
plot(t,qz(:));
title('Z CG');
figure(4);
plot(t,qd(:));
title('Yaw');
figure(5);
plot(t,qp(:));
title('Pitch');
figure(6);
plot(t,qr(:));
title('Roll');
figure(7);
```

```

plot(t,q1(:),',',t,q11(:),'o',t,q21(:),'x',t,q31(:),'+',t,q41(:),'*',t,q51(:));
legend('q1','q11','q21','q31','q41','q51');
title('qx1 (angulo bandeja)');
figure(8);
plot(timeplot2,camberdd,'o',timeplot2,camberde,'x',
timeplot2,cambertd,'+',timeplot2,camberte,'*',timeplot2,camberttd,',',timeplot2,cambertte);
legend('camber front right','camber front left','camber interm right','camber interm left',
'camber rear right','camber rear left');
title('camber angle 3 axles');
figure(9);
plot(timeplot2,fvertdd,',',timeplot2,fvertde,'o',timeplot2,fverttd,'x',
timeplot2,fvertte,'+',timeplot2,fvertttd,'*',timeplot2,fverttte);
legend('front right','front left','interm right','interm right','rear right','rear left');
title('Força vertical');
figure(10);
plot(timeplot2,b1plotdd,',',timeplot2,b1plotde,'o',timeplot2,b1plottd,'x',
timeplot2,b1plotte,'+',timeplot2,b1plotttd,'*',timeplot2,b1plottte);
legend('DD','DE','TD','TE','TTD','TTE');
title('b1');
figure(11);
plot(timeplot2,b2plotdd,timeplot2,b2plotde,
timeplot2,b2plottd,timeplot2,b2plotte,timeplot2,b2plotttd,timeplot2,b2plottte);
legend('DD','DE','TD','TE','TTD','TTE');
title('b2');
figure(12);
plot(timeplot2,b3plotdd,timeplot2,b3plotde,timeplot2,b3plottd,
timeplot2,b3plotte,timeplot2,b3plotttd,timeplot2,b3plottte);
legend('DD','DE','TD','TE','TTD','TTE');
title('b3');
figure(13);
plot(timeplot2,b4plotdd,timeplot2,b4plotde,
timeplot2,b4plottd,timeplot2,b4plotte,timeplot2,b4plotttd,timeplot2,b4plottte);
legend('DD','DE','TD','TE','TTD','TTE');
title('b4');
figure(14);
plot(timeplot2,b5plotdd,timeplot2,b5plotde,
timeplot2,b5plottd,timeplot2,b5plotte,timeplot2,b5plotttd,timeplot2,b5plottte);
legend('DD','DE','TD','TE','TTD','TTE');
title('b5');

```

```
figure(15);
plot(timeplot2,b9plotdd,timeplot2,b9plotde,
timeplot2,b9plottd,timeplot2,b9plotte,t imeplot2,b9plotttd,timeplot2,b9plottte);
legend('DD','DE','TD','TE','TTD','TTE');
title('b9');
figure(16);
plot(timeplot2,b10plotdd,timeplot2,b10plotde,
timeplot2,b10plottd,timeplot2,b10pl otte,timeplot2,b10plotttd,timeplot2,b10plottte);
legend('DD','DE','TD','TE','TTD','TTE');
title('b 10');
figure(17);
plot(timeplot2,yaccelplot);
title('yaccelplot') figure(18);
plot(t,pitchrate);
title('pitchrate');
figure(19);
plot(t,rollrate);
title('rollrate');
figure(20);
plot(t,yawrate);
title('yawrate');
hold on figure(21);
plot(x1*ones(500,1),y1,'k');
hold on;
plot(x2*ones(500,1),y2,'k');
hold on;
plot(x3,y3*ones(1,500),'k');
hold on;
plot(x4,y4*ones(1,500),'k');
hold on;
plot(x5*ones(500,1),y5,'k');
hold on;
plot(x6*ones(500,1),y6,'k');
hold on;
plot(x7,y7*ones(1,500),'k');
hold on;
plot(x8,y8*ones(1,500),'k');
hold on;
plot(x9*ones(500,1),y9,'k');
```

```
hold on;
plot(x10*ones(500,1),y10,'k');
grid on;
xlabel('Yc(m)');
ylabel('Xc(m)');
hold on;
plot(-1*qy,qx);
legend('Y CG');
hold on plot(-1*ypddi, xpddi, -1*ypdei, xpdei, -1*yptdi, xptdi, -1*ypte, xpte, -1*ypttdi,
xpttdi, -1*ypttei, xpttei);
hold off;
figure(22);
plot(timeplot2,convde,timeplot2,convte,timeplot2,convtte);
legend('DIANT','INTERM','TRAS');
title('ang conv');
figure(23);
plot(timeplot2,flatplot,timeplot2,flatplot2,
timeplot2,flatplot3,timeplot2,flatplot4,timeplot2,flatplot5,timeplot2,flatplot6);
title('Flateral');
figure(24);
plot(timeplot2,deltaddvet,timeplot2,deltadevet,
timeplot2,deltatdvet,timeplot2,deltatevet,timeplot2,deltattdvet,timeplot2,deltattevet);
title('Deltapneu');
figure(25);
plot(timeplot2,vetqvol);
title('angulo do volante');
figure(26);
plot(timeplot2,defdd,timeplot2,defde,
timeplot2,deftd,timeplot2,defte,timeplot2,defttd,timeplot2,deftte);
title('Deformação na suspensao');
```

APÊNDICE B – PROGRAMA 2

```

function yp=func_veic3eixos(t,y)
%MODELO_TRIDIMENSIONAL_VEICULO_TRES_EIXOS
%PARAMETROS_VBTP_6X6_GUARANI
%DISSERTACAO_MESTRADO_IME_2020
%RAFAEL_VITOR_GUERRA_QUEIROZ
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DIREITA(DIMENSOES)
global jcfdd jcgdd jchdd jcmdd jbmdd fdmdd fbmdd demdd hbmdd hgmdd ro1dd ro2dd
clfdd global clgdd clhdd clmdd f1dd f2dd f3dd g1dd g2dd g3dd h1dd h2dd h3dd Rodd
Roodd rrrdd
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DIREITA(MASSA_E_INERCIA)
global m3dd m7dd T3ddcm T7ddcm
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DIREITA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global pdd badd clivredd ccompdd kmdd kbatsdd
global kbatidd rapddc
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA ESQUERDA(DIMENSOES)
global jcfde jcgde jchde jcmde jbmde fdmde fbmde demde hbmde hgmde ro1de ro2de clfde
global clgde clhde clmde f1de f2de f3de g1de g2de g3de h1de h2de h3de Rode Roode rrde
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA ESQUERDA(MASSA_E_INERCIA)
global m3de m7de T3decem T7decem
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO DIANTEIRA ESQUERDA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global pde bade clivrede ccompde kmde kbatsde global kbatide rapdec
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA DIREITA(DIMENSOES)
global jcftd jcgtd jchtd jcmtd jbmtd fdmtd fbmtd demtd hbmtd hgmtd ro1td ro2td clftd
global clgtd clhtd clmtd f1td f2td f3td g1td g2td g3td h1td h2td h3td Rotd Rootd rrrtd
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA DIREITA(MASSA_E_INERCIA)
global m3td m7td T3tdcem T7tdcem
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA DIREITA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global ptd batd clivretd ccomptd kmtd kbatstd global kbatitd raptde
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA ESQUERDA(DIMENSOES)
global jcfte jcgte jchte jcmte jbmte fdmte fbmte demte hbmte hgmte ro1te ro2te clfte
global clgte clhte clmte f1te f2te f3te g1te g2te g3te h1te h2te h3te Rote Roote rrte
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA ESQUERDA(MASSA_E_INERCIA)
global m3te m7te T3tecm T7tecm
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO INTERMEDIARIA ESQUERDA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global pte bate clivrete ccompte kmte kbatste global kbatite raptdec

```

```
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA DIREITA(DIMENSOES)
global jcfstd jcgstd jchstd jcmstd jbmstd fdmstd fbmstd demstd hbmstd hgmstd ro1std
ro2std clfst
global clgstd clhstd clmstd f1std f2std f3std g1std g2std g3std h1std h2std h3std Rostd
Rootd rrtstd
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA DIREITA(MASSA_E_INERCIA)
global m3std m7std T3stdcm T7stdcm
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA DIREITA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global pstd batstd clivretstd ccomptstd kmstd kbatstd global kbatistd rapstdc
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA ESQUERDA(DIMENSOES)
global jcfste jcgste jchste jcmste jbmste fdmste fbmste demste hbmste hgmste ro1ste ro2ste
clfste
global clgste clhste clmste f1ste f2ste f3ste g1ste g2ste g3ste h1ste h2ste h3ste Rotte Rootte
rrtste
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA ESQUERDA(MASSA_E_INERCIA)
global m3ste m7ste T3stecm T7stecm
% VARIÁVEIS DA SUSPENSÃO TRASEIRA ESQUERDA(RIGIDEZ_AMORTECIMENTO)
global ptte batte clivrette ccomptte kmste kbatstte
global kbatistte rapsttec
%TEMPO_MANOBRA
global dt
%ANGULO DE CAMBER
global camberdd camberde cambertd camberte camberttd cambertte
% VARIÁVEIS DOS PNEUS
global rroda hp kp kbatp rpneu
% VARIÁVEIS DO SISTEMA DE DIREÇÃO
global coefest
%RAZAO_ ESTERÇAMENTO_EIXO_INTERMEDIARIO_E_DIANTEIRO
global angvol1 angvol2 angvol3 angvol4
% VARIÁVEIS DO CHASSIS
global uc mc Tccm g
%VARIABLES_PARA_PLOTAGEM_DOS_GRAFICOS
global flatplot flatplot2 flatplot3 flatplot4 flatplot5 flatplot6
%PLOTAR_FORÇA_LAT
global yaccelplot
%PLOTAR_ACEL_LAT
global deltaddvet deltadevet deltadvet deltatevet deltattddvet deltattvet
%PLOTAR_DELTA_RODA
global iter
```

```

global vetqvol
global timeplot
global yawrate pitchrate rollrate
global convde convte convtte
global fvertdd fvertde fverttd fvertte fverttdd fverttte
global b1plotdd b2plotdd b3plotdd b4plotdd b5plotdd b9plotdd b10plotdd
global b1plotde b2plotde b3plotde b4plotde b5plotde b9plotde b10plotde
global b1plottd b2plottd b3plottd b4plottd b5plottd b9plottd b10plottd
global b1plotte b2plotte b3plotte b4plotte b5plotte b9plotte b10plotte
global b1plottdd b2plottdd b3plottdd b4plottdd b5plottdd b9plottdd b10plottdd
global b1plottte b2plottte b3plottte b4plottte b5plottte b9plottte b10plottte
global defdd defde deftd defte defttdd defttte
global xpddi ypddi xpdei ypdei xptdi yptdi xppei yppei xpttddi ypttddi xpttdei ypttdei
%CORNERING_COEFFICIENT
global CC_alfa
%VARIAVEIS_PARA_ESCOLHA_DA_SIMULAÇÃO
global escolhapneu escolhasusp escolhateste
%LEGENDA-
%DD-DIANTEIRA_DIREITA
%DE-DIANTEIRA_ESQUERDA
%TD-INTERMEDIARIA_DIREITA
%TE-INTERMEDIARIA_ESQUERDA
%TTD-TRASEIRA_DIREITA
%TTE-TRASEIRA_ESQUERDA
if(escolhasusp == 1)%1 - Pedroso, rigidez constante e amortecimento variavel
if(y(25)<=0)%y(25) = velocidade ang do braço inf susp diant dir
badd=10000;%bump
else
badd=27692.3072;%rebound
end
kmdd=193000;
if(y(27)<=0)%y(27) = velocidade ang do braço inf susp diant esq
bade=10000;%bump
else
bade=27692.3072;%rebound
end
kmde=202000;
if(y(29)<=0)%y(29) = velocidade ang do braço inf susp interm dir
batd=10000;%bump

```



```
else
batd=27692.3072;%rebound
end
kmtd=223000;
if(y(31)<=0)%y(31) = velocidade ang do braço inf susp interm esq
bate=10000;%bump
else
bate=27692.3072;%rebound
end
kmte=235000;
if(y(33)<=0)%y(33) = velocidade ang do braço inf susp tras dir
battd=10000;%bump
else
battd=27692.3072;%rebound
end
kmttd=267000;
if(y(35)<=0)%y(35) = velocidade ang do braço inf susp tras esq
batte=10000;%bump
else
batte=27692.3072;%rebound
end
kmtte=283000;
end
if(escolhasusp == 2)%2 = Pedroso, rigidez e amortecimento variaveis
%Nao existe k, a força elastica eh calculada depois
if(y(25)<=0)%y(25) = velocidade ang do braço inf susp diant dir
badd=10000;%bump
else
badd=27692.3072;%rebound
end
if(y(27)<=0)%y(27) = velocidade ang do braço inf susp diant esq
bade=10000;%bump
else
bade=27692.3072;%rebound
end
if(y(29)<=0)%y(29) = velocidade ang do braço inf susp interm dir
batd=10000;%bump
else
batd=27692.3072;%rebound
```

```
end
if(y(31)<=0)%y(31) = velocidade ang do braço inf susp interm esq
bate=10000;%bump
else
bate=27692.3072;%rebound
end
if(y(33)<=0)%y(33) = velocidade ang do braço inf susp tras dir
battd=10000;%bump
else
battd=27692.3072;%rebound
end
if(y(35)<=0)%y(35) = velocidade ang do braço inf susp tras esq
batte=10000;%bump
else
batte=27692.3072;%rebound
end
end
qp=y(5);% ângulo de arfagem do chassis ("pitch angle")
qr=y(6);% ângulo de rolagem do chassis ("roll angle")
q1=y(7);% ângulo entre a bandeja DD e o chassis
q2=y(8);% deslocamento angular da roda DD
q11=y(9);% ângulo entre a bandeja DE e o chassis
q12=y(10);% deslocamento angular da roda DE
q21=y(11);% ângulo entre a bandeja TD e o chassis
q22=y(12);% deslocamento angular da roda TD
q31=y(13);% ângulo entre a bandeja TE e o chassis
q32=y(14);% deslocamento angular da roda TE
q41=y(15);% ângulo entre a bandeja TTD e o chassis
q42=y(16);% deslocamento angular da roda TTD
q51=y(17);% ângulo entre a bandeja TTE e o chassis
q52=y(18);% deslocamento angular da roda TTE
dqx=y(19);% velocidade longitudinal do chassis
dqy=y(20);% velocidade lateral do chassis
dqz=y(21);% velocidade vertical do chassis
dqd=y(22);% velocidade angular de direção do chassis
dqp=y(23);% velocidade angular de arfagem do chassis
dqr=y(24);% velocidade angular de rolagem do chassis
dq1=y(25);% velocidade angular da bandeja DD
dq2=y(26);% velocidade angular da roda DD
```

```

dq11=y(27);% velocidade angular da bandeja DE
dq12=y(28);% velocidade angular da roda DE
dq21=y(29);% velocidade angular da bandeja TD
dq22=y(30);% velocidade angular da roda TD
dq31=y(31);% velocidade angular da bandeja TE
dq32=y(32);% velocidade angular da roda TE
dq41=y(33);% velocidade angular da bandeja TD
dq42=y(34);% velocidade angular da roda TD
dq51=y(35);% velocidade angular da bandeja TE
dq52=y(36);% velocidade angular da roda TE
u=dqx*cos(qd)+dqy*sin(qd);
v=-dqx*sin(qd)+dqy*cos(qd);
%INPUT DA DIREÇÃO
%ESCOLHA DA MANOBRA
if(escolhateste == 1)%Submetido somente ao proprio peso
if(escolhasusp == 1)
qvol = -0.18935;
end
if(escolhasusp == 2)
qvol = 0.010076;
end
if(escolhasusp == 3)
qvol = 0.02588;
end
end
if(escolhateste == 2)%1 = Trajetoria circular em regime permanente
if(escolhasusp == 1)
tinicio=10;
tfim=15;
if (t<=tinicio)
qvol=-0.18935;
end
if (t>tinicio && t<=tfim)
qvol=-0.18935+angvoll*(sin(pi/2*(t-tinicio)/(tfim-tinicio)));
end
if (t>tfim)
qvol=-0.18935+angvoll;
end
end
end

```

```
if(escolhasusp == 2)
tinicio=10;
tfim=15;
if (t<=tinicio)
qvol=0.010076;
end
if (t>tinicio && t<=tfim)
qvol=0.010076+angvol1*(sin(pi/2*(t-tinicio)/(tfim-tinicio)));
end
if (t>tfim)
qvol=0.010076+angvol1;
end
end
if(escolhasusp == 3)
tinicio=25;
tfim=30;
if (t<=tinicio)
qvol=0.02588;
end
if (t>tinicio && t<=tfim)
qvol=0.02588+angvol1*(sin(pi/2*(t-tinicio)/(tfim-tinicio)));
end
if (t>tfim)
qvol=0.02588+angvol1;
end
end
end
if(escolhatestes==3)%3 = Manobra dupla evasiva
if(escolhasusp == 1)
ti1=10;
tf1=ti1+dt;
if (t<=ti1)
qvol=-0.18935;
end
if (t>ti1 && t<=tf1)
qvol=-0.18935+angvol1*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti1)));
end
ti2=tf1;
tf2=ti2+dt;
```

```
if (t>ti2 && t<=tf2)
qvol=-0.18935-angvol2*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti2)));
end
ti3=tf2;
tf3=ti3+(20/uc);
if (t>ti3 && t<=tf3) qvol=-0.18935;
end
ti4=tf3;
tf4=ti4+dt;
if (t>ti4 && t<=tf4)
qvol=-0.18935-angvol3*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti4)));
end
ti5=tf4;
tf5=ti5+dt;
if (t>ti5 && t<=tf5)
qvol=-0.18935+angvol4*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti5)));
end
ti6=tf5;
if (t>ti6)
qvol=-0.18935;
end
end
if(escolhasusp == 2)
ti1=10;
tf1=ti1+dt;
if (t<=ti1)
qvol=0.010076;
end
if (t>ti1 && t<=tf1)
qvol=0.010076+angvol1*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti1)));
end
ti2=tf1;
tf2=ti2+dt;
if (t>ti2 && t<=tf2)
qvol=0.010076-angvol2*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti2)));
end
ti3=tf2;
tf3=ti3+(20/uc);
if (t>ti3 && t<=tf3)
```

```
qvol=0.010076;
end
ti4=tf3;
tf4=ti4+dt;
if (t>ti4 && t<=tf4)
qvol=0.010076-angvol3*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti4)));
end
ti5=tf4;
tf5=ti5+dt;
if (t>ti5 && t<=tf5)
qvol=0.010076+angvol4*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti5)));
end
ti6=tf5;
if (t>ti6)
qvol=0.010076;
end
end
if(escolhasusp == 3)
ti1=25;
tf1=ti1+dt;
if (t<=ti1)
qvol=0.02588;
end
if (t>ti1 && t<=tf1)
qvol=0.02588+angvol1*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti1)));
end
ti2=tf1;
tf2=ti2+dt;
if (t>ti2 && t<=tf2)
qvol=0.02588-angvol2*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti2)));
end
ti3=tf2;
tf3=ti3+(20/uc);
if (t>ti3 && t<=tf3)
qvol=0.02588;
end
ti4=tf3;
tf4=ti4+dt;
if (t>ti4 && t<=tf4)
```

```

qvol=0.02588-angvol3*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti4)));
end
ti5=tf4;
tf5=ti5+dt;
if (t>ti5 && t<=tf5)
qvol=0.02588+angvol4*(sin(pi*(1/dt)*(t-ti5)));
end
ti6=tf5;
if (t>ti6)
qvol=0.02588;
end
end
end
const_est=0.001;%Coeficiente angular da função linear que relaciona o comprimento da
cremalheira (variavel dependente) com o angulo do volante (variavel dependente)
q=[qx;qy;qz;qd;qp;qr;q1;q2;q11;q12;q21;q22;q31;q32;q41;q42;q51;q52];% vetor dos graus de
liberdade
dq=[dqx;dqy;dqz;dqd;dqp;dqr;dq1;dq2;dq11;dq12;dq21;dq22;dq31;dq32;dq41;dq42;dq51;dq52];%
vetor de velocidades dos graus de liberdade
%CHASSIS
% Matriz orientação do chassis e sua derivada
Ac=[(cos(qd)*cos(qp)) (-sin(qd)*cos(qr)+cos(qd)*sin(qp)*sin(qr))
(sin(qd)*sin(qr)+cos(qd)*sin(qp)*cos(qr)) (sin(qd)*cos(qp))
(cos(qd)*cos(qr)+sin(qd)*sin(qp)*sin(qr)) (-cos(qd)*sin(qr)+sin(qd)*sin(qp)*cos(qr))
(-sin(qp)) (cos(qp)*sin(qr)) (cos(qp)*cos(qr))];
DAc=dqd*[(-sin(qd)*cos(qp)) (-cos(qd)*cos(qr)-sin(qd)*sin(qp)*sin(qr))
(cos(qd)*sin(qr)- sin(qd)*sin(qp)*cos(qr)) (cos(qd)*cos(qp))
(-sin(qd)*cos(qr)+cos(qd)*sin(qp)*sin(qr)) (sin(qd)*sin(qr)+cos(qd)*sin(qp)*cos(qr)) 0 0
0];
DAc=DAc+dqp*[(-cos(qd)*sin(qp)) (cos(qd)*cos(qp)*sin(qr)) (cos(qd)*cos(qp)*cos(qr)) (-
sin(qd)*sin(qp)) (sin(qd)*cos(qp)*sin(qr)) (sin(qd)*cos(qp)*cos(qr)) (-cos(qp)) (-sin(qp)*sin(qr))
(-sin(qp)*cos(qr))];
DAc=DAc+dqr*[0 (sin(qd)*sin(qr)+cos(qd)*sin(qp)*cos(qr))
(sin(qd)*cos(qr)- cos(qd)*sin(qp)*sin(qr))
0 (-cos(qd)*sin(qr)+sin(qd)*sin(qp)*cos(qr)) (-cos(qd)*cos(qr)- sin(qd)*sin(qp)*sin(qr))
0 (cos(qp)*cos(qr)) (-cos(qp)*sin(qr))];
% Posição do centro de massa do chassis em relação ao referencial inercial
rci=[qx;qy;qz];
drci=[dqx;dqy;dqz];

```

```

% Determinação da matriz jacobiana das restrições de translação entre o chassis e o %
referencial inercial e sua derivada (Jc e DJc)
Gc=[0 (-sin(qd)) (cos(qd)*cos(qp)) 0 (cos(qd)) (sin(qd)*cos(qp)) 1 0 (-sin(qp))];
Jc=[eye(3) zeros(3);
zeros(3) Gc];
DGc=dqd*[0 (-cos(qd)) (-sin(qd)*cos(qp));
0 (-sin(qd)) (cos(qd)*cos(qp));
0 0 0];
DGc=DGc+dqp*[0 0 (-cos(qd)*sin(qp));
0 0 (-sin(qd)*sin(qp));
0 0 (-cos(qp))];
DJc=[zeros(3) zeros(3);
zeros(3) DGc];
% Determinação do tensor de inércia do chassi
Tcci=Ac*Tccm*(Ac. ');
Tci=[mc*eye(3) zeros(3) zeros(3) Tcci];
% Determinação do vetor velocidade angular
Wcitol=DAc*(Ac. ');
Wcix=Wcitol(3,2);
Wciy=Wcitol(1,3);
Wciz=Wcitol(2,1);
Wci=[Wcix;
Wciy;
Wciz];
% Determinação do vetor de forças giroscópicas (bc)
bc=[zeros(3,1);
Wcitol*Tcci*Wci];

% SUSPENSÃO DIANTEIRA DIREITA
% Determinação dos valores das coordenadas de junta
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
b1=q1;% ângulo entre a bandeja e o chassis
aux1=jcmdd^2+jbmdd^2-2*jbmdd*(jcgdd*sin(b1)+jchdd*cos(b1));
b2=pdd-sqrt(aux1);% deslocamento da mola ou amortecedor a partir da configuração de
curso máximo do amortecedor
b3=acos((jchdd-jbmdd*cos(b1))/(pdd-b2));% 2o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do
eixo + cubo da roda)
b4=atan2(jcfdd,(jbmdd*sin(b1)-jcgdd));% 1o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo
+ cubo da roda)

```



```

b5=q2;
% 2o TRANSFORMADOR (DIREÇÃO)
b6=b2;
b7=b3;
b8=b4;
b9=0.3178+const_est*qvol;% deslocamento linear da cremalheira % determinação de b10
- 3o ângulo de Euler do corpo 3
a1dd=-2*fdmdd*((clfdd-f2dd*b9)*cos(b8)+(clgdd-g2dd*b9)*sin(b8));
a2dd=2*fdmdd*((clfdd-f2dd*b9)*sin(b8)*cos(b7)-(clgdd-g2dd*b9)*cos(b8)*cos(b7)-(clhdd-
h2dd*b9)*sin(b7));
a3dd=-clmdd^2-(pdd-b6-fbmdd)^2-fdmdd^2+demdd^2
- (f2dd^2+g2dd^2+h2dd^2)*b9^2+2*(clfdd*f2dd+clgdd*g2dd+clhdd*h2dd)*b9-2*(pdd-
b6-fbmdd)*((clfdd-f2dd*b9)*sin(b8)*sin(b7)-(clgdd-g2dd*b9)*cos(b8)*sin(b7)+(clhdd-
h2dd*b9)*cos(b7));
a4dd=a1dd^2+a2dd^2-a3dd^2;
%discriminante da eq. do 2ograu que determina b10
if (a4dd>=0)
x1dd=(a1dd*a3dd+a2dd*sqrt(a4dd))/(a1dd^2+a2dd^2);
y1dd=(a2dd*a3dd-a1dd*sqrt(a4dd))/(a1dd^2+a2dd^2);
%x2dd=(a1dd*a3dd-a2dd*sqrt(a4dd))/(a1dd^2+a2dd^2);
%y2dd=(a2dd*a3dd+a1dd*sqrt(a4dd))/(a1dd^2+a2dd^2);
b10a=(pi/2)*(sign(y1dd)-1)+acos(sign(y1dd)*x1dd);
%b10b=(pi/2)*(sign(y2dd)-1)+acos(sign(y2dd)*x2dd);
b10=b10a;
end
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
V1m=[1 0
0 0
0 0
0 0
0 1];
jb121=2*jbmdd*(jcgdd*cos(b1)-jchdd*sin(b1));
jb122=2*(b2-pdd);
jb131=-jbmdd*sin(b1)/(pdd-b2);
jb132=-(jchdd-jbmdd*cos(b1))/(pdd-b2)^2;
jb133=-sin(b3);
jb141=jcfdd*jbmdd*cos(b1)/(jbmdd*sin(b1)-jcgdd)^2;
jb144=1+(tan(b4))^2;
Jb1=[1 0 0 0 0

```

```

jb121 jb122 0 0 0
jb131 jb132 jb133 0 0
jb141 0 0 jb144 0
0 0 0 0 1];
% 2o TRANSFORMADOR (DIREÇÃO)
V2m=[0 0
0 0
0 0
0 0
0 0];
jb251=-2*(pdd-b6-fbmdd)-2*((clfdd-f2dd*b9)*sin(b8)*sin(b7)
-(clgdd- g2dd*b9)*cos(b8)*sin(b7)+(clhdd-h2dd*b9)*cos(b7));
jb252=2*sin(b10)*fdmdd*(-(clfdd-f2dd*b9)*sin(b8)*sin(b7)+(clgdd- g2dd*b9)*cos(b8)*sin(b7)-
(clhdd-h2dd*b9)*cos(b7))+2*(pdd-b6-fbmdd)*((clfdd- f2dd*b9)*sin(b8)*cos(b7)-(clgdd-
g2dd*b9)*cos(b8)*cos(b7)-(clhdd-h2dd*b9)*sin(b7));
jb253=-2*fdmdd*(-(clfdd-f2dd*b9)*sin(b8)
+(clgdd- g2dd*b9)*cos(b8))*cos(b10)
+2*fdmdd*((clfdd-f2dd*b9)*cos(b8)*cos(b7)+(clgdd- g2dd*b9)*sin(b8)*cos(b7))*sin(b10)
+2*(pdd-b6-fbmdd)*((clfdd- f2dd*b9)*cos(b8)*sin(b7)+(clgdd-g2dd*b9)*sin(b8)*sin(b7));
jb254=-2*fdmdd*(-f2dd*cos(b8)-g2dd*sin(b8))*cos(b10)+2*fdmdd*(- f2dd*sin(b8)*cos(b7)+
g2dd*cos(b8)*cos(b7)+h2dd*sin(b7))*sin(b10)+2*(f2dd^2+g2dd^2
+h 2dd^2)*b9-2*(clfdd*f2dd+clgdd*g2dd+clhdd*h2dd)+2*(pdd-b6-fbmdd)*(- f2dd*sin(b8)*sin(b7)
+g2dd*cos(b8)*sin(b7)-h2dd*cos(b7));
jb255=-a1dd*sin(b10)+a2dd*cos(b10);
Jb2=[1 0 0 0 0
0 1 0 0 0
0 0 1 0 0
0 0 0 1 0
jb251 jb252 jb253 jb254 jb255];
% ACOPLAMENTO DOS TRANSFORMADORES
Vm=[V1m;
V2m];
% matriz seleção de entradas modificada
C21=[0 -1 0 0 0
0 0 -1 0 0
0 0 0 -1 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0];
Jbdd=[Jb1 zeros(5);

```

```

C21 Jb2];
%Determinação da matriz jacobiana relativa do mecanismo (Jr)
Jrdd=(inv(Jbdd))*Vm;
% Determinação do vetor de velocidades das coordenadas de junta (db)
db=Jrdd*[dq1;dq2];
db1=db(1);
db2=db(2);
db3=db(3);
db4=db(4);
db5=db(5);
db6=db(6);
db7=db(7);
db8=db(8);
db9=db(9);
db10=db(10);
% Determinação da derivada da matriz jacobiana beta do mecanismo(DJbdd)
djb121=2*jbmdd*(-jcgdd*sin(b1)-jchdd*cos(b1))*db1;
djb122=2*db2;
djb131=-jbmdd*(cos(b1)*(pdd-b2)*db1+sin(b1)*db2)/(pdd-b2)^2;
djb132=(-jbmdd*sin(b1)*(pdd-b2)*db1-2*(jchdd-jbmdd*cos(b1))*db2)/(pdd-b2)^3;
djb133=-(cos(b3))*db3;
djb141=-jcfdd*(jbmdd*sin(b1)*(jbmdd*sin(b1)-jcgdd)+2*jbmdd^2*cos(b1))
^2)*db1/(jbmdd*sin(b1)-jcgdd)^3;
djb144=2*tan(b4)*(1+(tan(b4))^2)*db4;
djb251=2*db6;
djb251=djb251+(-2*(clfdd-f2dd*b9)*sin(b8)*cos(b7)+2*(clgdd-g2dd*b9)*cos(b8)*cos(b7)
+2*(clhdd-h2dd*b9)*sin(b7))*db7;
djb251=djb251+(-2*(clfdd-f2dd*b9)*cos(b8)*sin(b7)
-2*(clgdd-g2dd*b9)*sin(b8)*sin(b7))*db8;
djb251=djb251+(2*f2dd*sin(b8)*sin(b7)
-2*g2dd*cos(b8)*sin(b7)+2*h2dd*cos(b7))*db9;
djb252=(-2*(clfdd-f2dd*b9)*sin(b8)*cos(b7)+2*(clgdd-g2dd*b9)*cos(b8)*cos(b7)+2*(clhdd-
h2dd*b9)*sin(b7))*db6;
djb252=djb252+(2*sin(b10)*fdmdd*
((-clfdd+f2dd*b9)*sin(b8)
cos(b7)+(clgdd-g2dd*b9)*cos(b8)*cos(b7)+(clhdd-h2dd*b9)*sin(b7))+(2*pdd-2*b6-2*fbmdd)*(-
(clfdd-f2dd*b9)*sin(b8)*sin(b7)+(clgdd-g2dd*b9)*cos(b8)*sin(b7)-(clhdd-h2dd*b9)*cos(b7)))*db7;
djb252=djb252+(2*sin(b10)*fdmdd*((-clfdd+f2dd*b9)*cos(b8)*sin(b7)-(clgdd-g2dd*b9)*sin(b8)
sin(b7))+(2*pdd-2*b6-2*fbmdd)*((clfdd-f2dd*b9)*cos(b8)*cos(b7)

```

$$\begin{aligned}
 &+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\cos(b7))*db8; \\
 \text{djb252} &=\text{djb252}+(2*\sin(b10)*\text{fddmdd}*(f2\text{dd}*\sin(b8)*\sin(b7)-g2\text{dd}*\cos(b8)*\sin(b7)+h2\text{dd}*\cos(b7)) \\
 &+(2*\text{pdd}-2*b6-2*\text{fbmdd})*(-f2\text{dd}*\sin(b8)*\cos(b7)+g2\text{dd}*\cos(b8)*\cos(b7)+h2\text{dd}*\sin(b7))*db9; \\
 \text{djb252} &=\text{djb252}+(2*\cos(b10)*\text{fddmdd}*((-cl\text{fdd}+f2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\sin(b7) \\
 &+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\cos(b8)*\sin(b7) \\
 &-(cl\text{hdd}-h2\text{dd}*b9)*\cos(b7))*db10; \\
 \text{djb253} &=(-2*(cl\text{fdd}-f2\text{dd}*b9)*\cos(b8)*\sin(b7)-2*(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\sin(b7))*db6; \\
 \text{djb253} &=\text{djb253}+(2*\text{fddmdd}*(-(cl\text{fdd}-f2\text{dd}*b9)*\cos(b8)*\sin(b7) \\
 &-(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\sin(b7))*\sin(b10)+(2*\text{pdd}-2*b6-2*\text{fbmdd} \\
 &((cl\text{fdd}-f2\text{dd}*b9)*\cos(b8)*\cos(b7)+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\cos(b7))*db7; \\
 \text{djb253} &=\text{djb253}+(-2*\text{fddmdd}*((-cl\text{fdd}+f2\text{dd}*b9)*\cos(b8)-(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\sin(b8))*\cos(b10) \\
 &+2*\text{fddmdd}*(-(cl\text{fdd}-f2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\cos(b7)+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\cos(b8)*\cos(b7))*\sin(b10)+(2*\text{pdd}- \\
 &2*b6-2*\text{fbmdd})* \\
 &(-cl\text{fdd}-f2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\sin(b7)+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\cos(b8)*\sin(b7))*db8; \\
 \text{djb253} &=\text{djb253}+(-2*\text{fddmdd}*(f2\text{dd}*\sin(b8)-g2\text{dd}*\cos(b8))*\cos(b10) \\
 &+2*\text{fddmdd}*(-f2\text{dd}*\cos(b8)*\cos(b7)-g2\text{dd}*\sin(b8)*\cos(b7))*\sin(b10)+(2*\text{pdd}-2*b6-2*\text{fbmdd})*(- \\
 &f2\text{dd}*\cos(b8)*\sin(b7) \\
 &-g2\text{dd}*\sin(b8)*\sin(b7))*db9; \\
 \text{djb253} &=\text{djb253}+(2*\text{fddmdd}*((-cl\text{fdd}+f2\text{dd}*b9)*\sin(b8) \\
 &+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\cos(b8))*\sin(b10)+2*\text{fddmdd}*((cl\text{fdd}-f2\text{dd}*b9)*\cos(b8)*\cos(b7)+(\text{clgdd}- \\
 &g2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\cos(b7))*\cos(b10))*db10; \\
 \text{djb254} &=(2*f2\text{dd}*\sin(b8)*\sin(b7) \\
 &-2*g2\text{dd}*\cos(b8)*\sin(b7)+2*h2\text{dd}*\cos(b7))*db6; \\
 \text{djb254} &=\text{djb254}+(2*\sin(b10)*\text{fddmdd}*(f2\text{dd}*\sin(b8)*\sin(b7)-g2\text{dd}*\cos(b8)*\sin(b7) \\
 &+h2\text{dd}*\cos(b7))+(2*\text{pdd}-2*b6-2*\text{fbmdd})*(-f2\text{dd}*\sin(b8)*\cos(b7)+g2\text{dd}*\cos(b8)*\cos(b7) \\
 &+h2\text{dd}*\sin(b7))*db7; \\
 \text{djb254} &=\text{djb254}+(-2*\text{fddmdd}*(f2\text{dd}*\sin(b8)-g2\text{dd}*\cos(b8))*\cos(b10)+2*\text{fddmdd}*(\\
 &-f2\text{dd}*\cos(b8)*\cos(b7)-g2\text{dd}*\sin(b8)*\cos(b7))*\sin(b10)+(2*\text{pdd}-2*b6-2*\text{fbmdd} \\
 &(-f2\text{dd}*\cos(b8)*\sin(b7)-g2\text{dd}*\sin(b8)*\sin(b7))*db8; \\
 \text{djb254} &=\text{djb254}+(2*f2\text{dd}^2+2*g2\text{dd}^2+2*h2\text{dd}^2)*db9; \\
 \text{djb254} &=\text{djb254}+(2*\text{fddmdd}*(-f2\text{dd}*\cos(b8)-g2\text{dd}*\sin(b8))*\sin(b10)+2*\text{fddmdd}*(-f2\text{dd}*\sin(b8)*\cos(b7) \\
 &+g2\text{dd}*\cos(b8)*\cos(b7)+h2\text{dd}*\sin(b7))*\cos(b10))*db10; \\
 \text{djb255} &=(2*\text{fddmdd}*(-(cl\text{fdd}-f2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\sin(b7)+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\cos(b8)*\sin(b7)-(cl\text{hdd}- \\
 &h2\text{dd}*b9)*\cos(b7))*\cos(b10))*db7; \\
 \text{djb255} &=\text{djb255}+(2*\text{fddmdd}*(-(cl\text{fdd}-f2\text{dd}*b9)*\sin(b8)+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\cos(b8))*\sin(b10)+2*\text{fddmdd}*(\\
 &f2\text{dd}*b9)*\cos(b8)*\cos(b7)+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\sin(b8)*\cos(b7))*\cos(b10))*db8; \\
 \text{djb255} &=\text{djb255}+(2*\text{fddmdd}*(-f2\text{dd}*\cos(b8)-g2\text{dd}*\sin(b8))*\sin(b10)+2*\text{fddmdd}*(-f2\text{dd}*\sin(b8)*\cos(b7) \\
 &+g2\text{dd}*\cos(b8)*\cos(b7)+h2\text{dd}*\sin(b7))*\cos(b10))*db9; \\
 \text{djb255} &=\text{djb255}+(2*\text{fddmdd}*((cl\text{fdd}-f2\text{dd}*b9)*\cos(b8)+(\text{clgdd}-g2\text{dd}*b9)*\sin(b8))*\cos(b10)-
 \end{aligned}$$

```

2*fdmdd*((clfdd-f2dd*b9)*sin(b8)*cos(b7)-(clgdd-g2dd*b9)*cos(b8)*cos(b7)
-(clhdd- h2dd*b9)*sin(b7))*sin(b10))*db10;
DJb1=[0 0 0 0 0
djb121 djb122 0 0 0
djb131 djb132 djb133 0 0
djb141 0 0 djb144 0
0 0 0 0 0];
DJb2=[0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
djb251 djb252 djb253 djb254 djb255];
DJb=[DJb1 zeros(5);
zeros(5) DJb2];
% derivada da matriz jacobiana beta de restrições
% Determinação da derivada da matriz jacobiana relativa(DJrdd)
djr21=(-djb121*jb122+jb121*djb122)/(jb122)^2;
djr31=(-djb131*jb133+jb131*djb133)/jb133^2;
djr31=djr31+(jb122*jb133*(jb132*djb121+djb132*jb121)- jb121*jb132*
(djb133*jb122+jb133*djb122))/(jb133*jb122)^2;
djr41=(-djb141*jb144+jb141*djb144)/jb144^2;
djr61=djr21;
djr71=djr31;
djr81=djr41;
djr101=(jb144*jb255*(djb141*jb253+jb141*djb253)- jb141*jb253*(djb144*jb255+jb144*djb255))
/(jb144*jb255)^2;
djr101=djr101+
(jb133*jb255*(djb131*jb252+jb131*djb252)- jb131*jb252*(djb133*jb255+
jb133*djb255))/(jb133*jb255)^2;
djr101=djr101+
(jb122*jb255*(djb121*jb251+jb121*djb251)- jb121*jb251*(djb122*jb255+jb122*djb255))
/(jb122*jb255)^2;
djr101=djr101-
(jb122*jb133*jb255*(djb121*jb132*jb252+jb121*djb132*jb252+jb121*jb132*djb252)
- jb121*jb132*jb252*(djb122*jb133*jb255+jb122*djb133*jb255+jb122
jb133*djb255))/(jb122* jb133*jb255)^2;
% derivada da matriz jacobiana relativa
DJrdd=[0 0
djr21 0

```

```

djr31 0
djr41 0
0 0
djr61 0
djr71 0
djr81 0
0 0
djr101 0];
% CINEMÁTICA ABSOLUTA
% Posição e velocidade linear dos C.M. dos corpos em relação ao referencial do chassis
% Corpo 2 (bandeja)
A2ddfgh=[1 0 0
0 sin(b1) -cos(b1)
0 cos(b1) sin(b1)];
A2ddc=Rodd*A2ddfgh;
DA2ddfgh=db1*[0 0 0;0 cos(b1) sin(b1);0 -sin(b1) cos(b1)];
A3ddfgh=[(cos(b8)*cos(b10)-sin(b8)*cos(b7)*sin(b10)) (-cos(b8)*sin(b10)- sin(b8)*cos(b7)*cos(b10))
(sin(b8)*sin(b7)) (sin(b8)*cos(b10)+cos(b8)*cos(b7)*sin(b10))
(- sin(b8)*sin(b10)+cos(b8)*cos(b7)*cos(b10))
(-cos(b8)*sin(b7)) (sin(b7)*sin(b10)) (sin(b7)*cos(b10)) (cos(b7))];
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh)
A3ddc=Rodd*A3ddfgh;
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (XYZ)c
r3dd=[0;
0;
hbmdd];
% posição do C.M. em relação à junta esférica (ponto B)
r3ddc=rrdd+A2ddc*[0;
jbmdd;
0]+A3ddc*r3dd;
DA3ddfgh=db7*[sin(b8)*sin(b7)*sin(b10) sin(b8)*sin(b7)*cos(b10) sin(b8)*cos(b7)
-cos(b8)*sin(b7)*sin(b10) -cos(b8)*sin(b7)*cos(b10) -cos(b8)*cos(b7) cos(b7)*sin(b10)
cos(b7)*cos(b10) -sin(b7)];
DA3ddfgh=DA3ddfgh+db8*[-sin(b8)*cos(b10)-cos(b8)*cos(b7)*sin(b10) sin(b8)*sin(b10)-
cos(b8)*cos(b7)*cos(b10) cos(b8)*sin(b7) cos(b8)*cos(b10)-sin(b8)*cos(b7)*sin(b10) -
cos(b8)*sin(b10)
- sin(b8)*cos(b7)*cos(b10) sin(b8)*sin(b7) 0 0 0];
DA3ddfgh=DA3ddfgh+db10*[-cos(b8)*sin(b10)-sin(b8)*cos(b7)*cos(b10) - cos(b8)*cos(b10)
+sin(b8)*cos(b7)*sin(b10) 0 -sin(b8)*sin(b10)+cos(b8)*cos(b7)*cos(b10) -sin(b8)*cos(b10)-

```

```

cos(b8)*cos(b7)*sin(b10) 0 sin(b7)*cos(b10) -sin(b7)*sin(b10) 0];
DA3ddc=Rodd*DA3ddfgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 3 para o referencial (XYZ)c
dr3ddc=DA2ddc*[0;jbmdd;0]+DA3ddc*r3dd;
% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
A2dd=[cos(b5) sin(b5) 0;0 0 1;sin(b5) -cos(b5) 0];
% matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4
A1dd=[cos(ro1dd) -sin(ro1dd)*cos(ro2dd) sin(ro1dd)*sin(ro2dd) sin(ro1dd) cos(ro1dd)*cos(ro2dd)
-cos(ro1dd)*sin(ro2dd) 0 sin(ro2dd) cos(ro2dd)];
A7ddfgh=A3ddfgh*A1dd*A2dd;
A7ddc=Rodd*A7ddfgh;
r7dd=[0;
0;
hgmdd];
% posição do C.M. em relação ao referencial (fgh)2 (ponto H)
r7ddc=rrdd+A2ddc*[0;jbmdd;0]+A3ddc*r3dd+A7ddc*r7dd;
DA2dd=db5*[-sin(b5) cos(b5) 0;0 0 0;cos(b5) sin(b5) 0];
DA7ddfgh=DA3ddfgh*A1dd*A2dd+A3ddfgh*A1dd*DA2dd;
% derivada da matriz transformação do corpo 7 para o referencial (fgh)
DA7ddc=Rodd*DA7ddfgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
dr7ddc=DA2ddc*[0;jbmdd;0]+DA3ddc*r3dd+DA7ddc*r7dd;
a12dd=[0;jbmdd*cos(b1);-jbmdd*sin(b1)];
a22dd=[0;0;0];
a32dd=[0;0;0];
a42dd=[0;0;0];
a52dd=[0;0;0];
a62dd=[0;0;0];
a72dd=[hbmdd*cos(b7)*sin(b8);
-hbmdd*cos(b7)*cos(b8);
-hbmdd*sin(b7)];
a82dd=[hbmdd*sin(b7)*cos(b8);
hbmdd*sin(b7)*sin(b8);
0];
a92dd=[0;
0;
0];
a102dd=[0;
0;

```

```
0];
b12dd=[0;
0;
0];
b22dd=[0;
0;
0];
b32dd=[0;
0;
0];
b42dd=[0;
0;
0];
b52dd=[0;
0;
0];
b62dd=[0;
0;
0];
b72dd=[cos(b8);
sin(b8);
0];
b82dd=[0;
0;
1];
b92dd=[0;
0;
0];
b102dd=[sin(b7)*sin(b8);
-sin(b7)*cos(b8);
cos(b7)];
% Corpo 7 (roda + pneu)
a13dd=[0;
jbmdd*cos(b1);
-jbmdd*sin(b1)];
a23dd=[0;
0;
0];
a33dd=[0;
```



```

0;
0];
a43dd=[0;
0;
0];
a53dd=[0;
0;
0];
a63dd=[0;
0;
0];
a73dd=[hbmdd*cos(b7)*sin(b8)- hgmdd*sin(b8)*sin(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)
+hgmdd*sin(b8)*sin(b7)*cos(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)+hgmdd*sin(b8)*cos(b7)*sin(ro2dd)
-hbmdd*cos(b7)*cos(b8)+hgmdd*cos(b8)*sin(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)
- hgmdd*cos(b8)*sin(b7)*cos(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)
- hgmdd*cos(b8)*cos(b7)*sin(ro2dd) -hbmdd*sin(b7)
- hgmdd*cos(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+hgmdd*cos(b7)*cos(b10)*cos(ro1dd)*cos(
ro2dd)-hgmdd*sin(b7)*sin(ro2dd)];
a83dd=[hbmdd*sin(b7)*cos(b8)+hgmdd*((sin(b8)*cos(b10)+cos(b8)*cos(b7)*sin(b10))*sin(
ro1dd)
cos(ro2dd)+(sin(b8)*sin(b10)
- cos(b8)*cos(b7)*cos(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)+cos(b8)*sin(b7)*sin(ro2dd))
hbmdd*sin(b7)*sin(b8)+
hgmdd*((-cos(b8)*cos(b10)+sin(b8)*cos(b7)*sin(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+(-cos(b8)*sin(b10)
- sin(b8)*cos(b7)*cos(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)+sin(b8)*sin(b7)*sin(ro2dd)) 0];
a93dd=[0;
0;
0];
a103dd=[hgmdd*((cos(b8)*sin(b10)+sin(b8)*cos(b7)*cos(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+(-
cos(b8)*cos(b10)+sin(b8)*cos(b7)*sin(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)) hgmdd*((sin(b8)*sin(b10)-
cos(b8)*cos(b7)*cos(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+(-sin(b8)*cos(b10)-cos(b8)*cos(b7)*sin(b10))
cos(ro1dd)*cos(ro2dd)) hgmdd*(-sin(b7)*cos(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)-
sin(b7)*sin(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)];
b13dd=[0;
0;
0];
b23dd=[0;
0;
0];

```

```

b33dd=[0;
0;
0];
b43dd=[0;
0;
0];
b53dd=[(cos(b8)*cos(b10)-sin(b8)*cos(b7)*sin(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)-(-cos(b8)*sin(b10)
-sin(b8)*cos(b7)*cos(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)-sin(b8)*sin(b7)*sin(ro2dd) (sin(b8)*cos(b10)
+cos(b8)*cos(b7)*sin(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)-(-sin(b8)*sin(b10)
+cos(b8)*cos(b7)*cos(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)+cos(b8)*sin(b7)*sin(ro2dd) sin(b7)*sin(b10)
sin(ro1dd)*cos(ro2dd)-sin(b7)*cos(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)-cos(b7)*sin(ro2dd)];
b63dd=[0;
0;
0];
b73dd=[cos(b8);
sin(b8);
0];
b83dd=[0;
0;
1];
b93dd=[0;
0;
0];
b103dd=[sin(b7)*sin(b8);
-sin(b7)*cos(b8);
cos(b7)];
% Jacobina absoluta (Jadd)
Jadd=[a12dd a22dd a32dd a42dd a52dd a62dd a72dd a82dd a92dd a102dd b12dd b22dd
b32dd b42dd b52dd b62dd b72dd b82dd b92dd b102dd a13dd a23dd a33dd a43dd a53dd
a63dd a73dd a83dd a93dd a103dd b13dd b23dd b33dd b43dd b53dd b63dd b73dd b83dd
b93dd b103dd];
% Derivada da Jacobiana absoluta(DJadd)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior) da12dd=[0;
-jbmdd*sin(b1)*db1;
-jbmdd*cos(b1)*db1];
da22dd=[0;
0;
0];
da32dd=[0;

```

```
0;
0];
da42dd=[0;
0;
0];
da52dd=[0;
0;
0];
da62dd=[0;
0;
0];
da72dd=[hbmdd*(- sin(b7)*sin(b8)*db7+cos(b7)*cos(b8)*db8);
hbmdd*(sin(b7)*cos(b8)*db7+cos(b7)*sin(b8)*d b8);
-hbmdd*cos(b7)*db7];
da82dd=[hbmdd*(cos(b7)*cos(b8)*db7- sin(b7)*sin(b8)*db8);
hbmdd*(cos(b7)*sin(b8)*db7+sin(b7)*cos(b8)*db8);
0];
da92dd=[0;
0;
0];
da102dd=[0;
0;
0];
db12dd=[0;
0;
0];
db22dd=[0;
0;
0];
db32dd=[0;
0;
0];
db42dd=[0;
0;
0];
db52dd=[0;
0;
0];
db62dd=[0;
```

```

0;
0];
db72dd=[-sin(b8)*db8;
cos(b8)*db8;
0];
db82dd=[0;
0;
0];
db92dd=[0;
0;
0];
db102dd=[(cos(b7)*sin(b8)*db7+sin(b7)*cos(b8)*db8);
(-cos(b7)*cos(b8)*db7+sin(b7)*sin(b8)*db8);
-sin(b7)*db7];
% Corpo 7 (roda + pneu) da13dd=[0;
-jbmdd*sin(b1)*db1;
-jbmdd*cos(b1)*db1];
da23dd=[0;
0;
0];
da33dd=[0;
0;
0];
da43dd=[0;
0;
0];
da53dd=[0;
0;
0];
da63dd=[0;
0;
0];
da73ddx=db7*(-hbmdd*sin(b7)*sin(b8)- hgmdd*sin(b8)
cos(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+hgmdd*sin(b8)*cos(b7)*cos(b10)
cos(ro1dd)*cos(ro2dd)-hgmdd*sin(b8)*sin(b7)
sin(ro2dd));
da73ddx=da73ddx+db8*(hbmdd*cos(b7)*cos(b8)- hgmdd*cos(b8)
sin(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+hgmdd*cos(b8)*sin(b7)*cos(b10)
cos(ro1dd)*cos(ro2dd)

```

```

+hgmdd*cos(b8)*cos(b7)*sin(ro2dd));
da73ddx=da73ddx+db10*(-hgmdd*sin(b8)*sin(b7)*cos(b10)
sin(ro1dd)*cos(ro2dd)- hgmdd*sin(b8)
sin(b7)*sin(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd));
da73ddy=db7*(hbmdd*sin(b7)*cos(b8)+hgmdd*cos(b8)
cos(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)- hgmdd*cos(b8)
cos(b7)*cos(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)+hgmdd*cos(b8)*sin(b7)*sin(ro2dd));
da73ddy=da73ddy+db8*(hbmdd*cos(b7)*sin(b8)- hgmdd*sin(b8)
sin(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)
+hgmdd*sin(b8)*sin(b7)*cos(b10)*cos(ro1dd)
cos(ro2dd)+hgmdd*sin(b8)*cos(b7)*sin(ro2dd));
da73ddy=da73ddy+db10*(hgmdd*cos(b8)*sin(b7)*cos(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+hgmdd
*cos(b8)*sin(b7)*sin(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd));
da73ddz=db7*(-hbmdd*cos(b7)+hgmdd*sin(b7)*sin(b10)
sin(ro1dd)*cos(ro2dd)- hgmdd*sin(b7)
cos(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)-hgmdd*cos(b7)*sin(ro2dd));
da73ddz=da73ddz+db10*(-hgmdd*cos(b7)*cos(b10)
sin(ro1dd)*cos(ro2dd)- hgmdd*cos(b7)*sin(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd));
da73dd=[da73ddx;
da73ddy;
da73ddz];
da83ddx=db7*(hbmdd*cos(b7)*cos(b8)+hgmdd*(-cos(b8)
sin(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+cos(b8)*sin(b7)*cos(b10)
cos(ro1dd)*cos(ro2dd)+cos(b8)*cos(b7)*sin(ro2dd));
da83ddx=da83ddx+db8*(-hbmdd*sin(b7)*sin(b8)
+hgmdd*((cos(b8)*cos(b10)-sin(b8)
cos(b7)*sin(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+(cos(b8)*sin(b10)+sin(b8)
cos(b7)*cos(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)-sin(b8)*sin(b7)
sin(ro2dd)));
da83ddx=da83ddx+db10*(hgmdd*((-sin(b8)*sin(b10)
+cos(b8)*cos(b7)*cos(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+(sin(b8)*cos(b10)
+cos(b8)*cos(b7)*sin(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd));
da83ddy=db7*(hbmdd*cos(b7)*sin(b8)+hgmdd*(-sin(b8)*sin(b7)
sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+sin(b8)*sin(b7)*cos(b10)*cos(ro1dd)
cos(ro2dd)+sin(b8)*cos(b7)*sin(ro2dd));
da83ddy=da83ddy+db8*(hbmdd*sin(b7)*cos(b8)+hgmdd
((sin(b8)*cos(b10)+cos(b8)*cos(b7)*sin(b10))
sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+(sin(b8)*sin(b10)-cos(b8)
cos(b7)*cos(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)+cos(b8)*sin(b7)*sin(ro2dd));

```

```

da83ddy=da83ddy+db10*(hgmdd*((cos(b8)*sin(b10)+sin(b8)*cos(b7)*cos(b10))*sin(ro1dd)
*cos(ro2dd)+(-cos(b8)*cos(b10)+sin(b8)*cos(b7)*sin(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd));
da83dd=[da83ddx;
da83ddy;
0];
da93dd=[0;
0;
0];
da103ddx=db7*(hgmdd*(-sin(b8)*sin(b7)*cos(b10)
sin(ro1dd)*cos(ro2dd)- sin(b8)*sin(b7)*sin(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)));
da103ddx=da103ddx+db8*(hgmdd*((- sin(b8)*sin(b10)
+cos(b8)*cos(b7)*cos(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+(sin(b8)*cos(b10)
+cos( b8)*cos(b7)*sin(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)));
da103ddx=da103ddx+db10*(hgmdd*((cos(b8)*cos(b10)- sin(b8)
cos(b7)*sin(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+(cos(b8)*sin(b10)+sin(b8)
cos(b7)*cos(b 10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)));
da103ddy=db7*(hgmdd*(cos(b8)*sin(b7)*cos(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+cos(b8)*sin(b7)*
sin(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)));
da103ddy=da103ddy+db8*(hgmdd*((cos(b8)*sin(b10)+sin(b8)*cos(b7)*cos(b10))*sin(ro1d
d)*cos(ro2dd)+(-cos(b8)*cos(b10)+sin(b8)*cos(b7)*sin(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)));
da103ddy=da103ddy+db10*(hgmdd*((sin(b8)*cos(b10)+cos(b8)*cos(b7)*sin(b10))*sin(ro1
dd)*cos(ro2dd)+(sin(b8)*sin(b10)-cos(b8)*cos(b7)*cos(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)));
da103ddz=db7*(hgmdd*(-cos(b7)*cos(b10)*sin(ro1dd)
cos(ro2dd)- cos(b7)*sin(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)));
da103ddz=da103ddz+db10*(hgmdd*(sin(b7)*sin(b10)
sin(ro1dd)*cos(ro2dd)- sin(b7)
cos(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)));
da103dd=[da103ddx;
da103ddy;
da103ddz];
db13dd=[0;
0;
0];
db23dd=[0;
0;
0];
db33dd=[0;
0;
0];

```

```

db43dd=[0;
0;
0];
db53ddx=db7*(sin(b8)*sin(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)
cos(ro2dd)- sin(b8)*sin(b7)*cos(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)-sin(b8)
cos(b7)*sin(ro2dd));
db53ddx=db53ddx+db8
((-sin(b8)*cos(b10)- cos(b8)*cos(b7)
sin(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)-(sin(b8)*sin(b10)- cos(b8)*cos(b7)
cos(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)-cos(b8)*sin(b7)*sin(ro2dd));
db53ddx=db53ddx+db10*((-cos(b8)*sin(b10)- sin(b8)*cos(b7)*cos(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)-
(- cos(b8)*cos(b10)+sin(b8)*cos(b7)*sin(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd));
db53ddy=db7*(- cos(b8)
sin(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)+cos(b8)*sin(b7)*cos(b10)
cos(ro1dd)*cos( ro2dd)+cos(b8)*cos(b7)*sin(ro2dd));
db53ddy=db53ddy+db8*((cos(b8)*cos(b10)- sin(b8)*cos(b7)*sin(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)-
(-cos(b8)*sin(b10)- sin(b8)*cos(b7)*cos(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)-sin(b8)*sin(b7)*sin(ro2dd));
db53ddy=db53ddy+db10*((- sin(b8)*sin(b10)+cos(b8)*cos(b7)*cos(b10))*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)-
(-sin(b8)*cos(b10)- cos(b8)*cos(b7)*sin(b10))*cos(ro1dd)*cos(ro2dd));
db53ddz=db7*(cos(b7)*sin(b10)*sin(ro1dd)*cos(ro2dd)
- cos(b7)*cos(b10)*cos(ro1dd)*cos(ro2dd)+sin(b7)*sin(ro2dd));
db53ddz=db53ddz+db10*(sin(b7)*cos(b10)*sin(ro1dd)
cos(ro2dd)+sin(b7)*sin(b10)*cos(ro 1dd)*cos(ro2dd));
db53dd=[db53ddx;
db53ddy;
db53ddz];
db63dd=[0;
0;
0];
db73dd=[-sin(b8)*db8;
cos(b8)*db8;
0];
db83dd=[0;
0;
0];
db93dd=[0;
0;
0];
db103dd=[(cos(b7)*sin(b8)*db7+sin(b7)*cos(b8)*db8);

```

```

(- cos(b7)*cos(b8)*db7+sin(b7)*sin(b8)*db8);
-sin(b7)*db7];
% Derivada da Jacobina absoluta (DJadd)
DJadd=[da12dd da22dd da32dd da42dd da52dd da62dd da72dd da82dd da92dd da102dd
db12dd db22dd db32dd db42dd db52dd db62dd db72dd db82dd db92dd db102dd da13dd
da23dd da33dd da43dd da53dd da63dd da73dd da83dd da93dd da103dd db13dd db23dd
db33dd db43dd db53dd db63dd db73dd db83dd db93dd db103dd];
% Determinação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) e sua derivada (Jgsdd e
DJgsdd) Jgsdd=Jadd*Jrdd;
DJgsdd=DJadd*Jrdd+Jadd*DJrdd;
% Transformação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) para o referencial (XYZ)c
Jgcdd=Roodd*Jgsdd;
%(12x2) %Nao ha movimento relativo entre o CG do chassi e o ref susp, por isso a matriz
eh Roodd Jgdd=[Jgcdd zeros(12,10)];
DJgcdd=Roodd*DJgsdd;
DJgdd=[DJgcdd zeros(12,10)];
%Submatrizes da matriz MKR %Ac eh a matriz de orientação do chassi (mudança do ref
chassi para ref inercial) L3dd=Ac*r3ddc;
L3ddtil=[0 -L3dd(3) L3dd(2);
L3dd(3) 0 -L3dd(1);
-L3dd(2) L3dd(1) 0];
% matriz antissimétrica de L3 K3dd=[eye(3) -L3ddtil;
zeros(3) eye(3)];
R3dd=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
L7dd=Ac*r7ddc;
L7ddtil=[0 -L7dd(3) L7dd(2);
L7dd(3) 0 -L7dd(1);
-L7dd(2) L7dd(1) 0];
% matriz antissimétrica de L7 K7dd=[eye(3) -L7ddtil;
zeros(3) eye(3)];
R7dd=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
%Derivadas das submatrizes da matriz DMKR DL3dd=Ac*dr3ddc+DAc*r3ddc;
DL3ddtil=[0 -DL3dd(3) DL3dd(2);
DL3dd(3) 0 -DL3dd(1);
-DL3dd(2) DL3dd(1) 0];
% matriz antissimétrica de DL3 DK3dd=[zeros(3) -DL3ddtil;
zeros(3) zeros(3)];

```



```

DR3dd=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
DL7dd=Ac*dr7ddc+DAc*r7ddc;
DL7ddtil=[0 -DL7dd(3) DL7dd(2);
DL7dd(3) 0 -DL7dd(1);
-DL7dd(2) DL7dd(1) 0];
% matriz antissimétrica de DL7 DK7dd=[zeros(3) -DL7ddtil;
zeros(3) zeros(3)];
DR7dd=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
% Determinação do tensor de inércia de todos os corpos no referencial inercial
T3ddi=(Ac*Rodd*A3ddfgh)*T3ddcm*((A3ddfgh.')(Rodd.')(Ac.));
T7ddi=(Ac*Rodd*A3ddfgh*A1dd*A2dd)*T7ddcm*((A2dd.')(A1dd.')(A3ddfgh.')(Rodd.')(A
c.));
Tddi=[m3dd*eye(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3) T3ddi zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) m7dd*eye(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3) T7ddi];
% Determinação dos vetores de velocidades angulares dos corpos em relação ao referencial
inercial
W3ddtil=(Ac*DA3ddc+DAc*A3ddc)*((Ac*A3ddc.));
W3ddix=W3ddtil(3,2);
W3ddiy=W3ddtil(1,3);
W3ddiz=W3ddtil(2,1);
W3ddi=[W3ddix;
W3ddiy;
W3ddiz];
W7ddtil=(Ac*DA7ddc+DAc*A7ddc)*((Ac*A7ddc.));
W7ddix=W7ddtil(3,2);
W7ddiy=W7ddtil(1,3);
W7ddiz=W7ddtil(2,1);
W7ddi=[W7ddix;
W7ddiy;
W7ddiz];
% Determinação do vetor de forças giroscópicas (bsdd)
bs3dd=[zeros(3,1);
W3ddtil*T3ddi*W3ddi];
bs7dd=[zeros(3,1);
W7ddtil*T7ddi*W7ddi];
bsdd=[bs3dd;
bs7dd];

```

```

% Determinação da força da mola (Fmdd)
if(escolhasusp == 1)
    cinstdd=ccompdd-b2;
    dmdd=clivredd-cinstdd;
    fmdd=kmdd*dmdd;
end
if(escolhasusp == 2)
    dmdd=b2;
    fmdd=2.388*10^4*exp(0.008647*dmdd*1000)+50.58*exp(0.05956*dmdd*1000);
end
if(escolhasusp == 3)
    dmdd=b2;
    fmdd=9.9314*(2.388*10^4*exp(0.008647*dmdd*1000)+50.58*exp(0.05956*dmdd*1000));
end % Determinação da força do amortecedor (Fbdd)
fadd=badd*db2;
% Determinação da força vertical provocada pela deflexão do pneu (Fpdd)
r7ddi=rci+Ac*r7ddc;
rrddfgh4=[0;
0;
-rroda];
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial (fgh)4
rrddc=r7ddc+Rodd*A3ddfgh*A1dd*rrddfgh4;
rrddi=rci+Ac*rrddc;
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial inercial
rpddfgh4=[0;
0;
-rroda-hp];
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial (fgh)4
rpddi=r7ddi+Ac*Rodd*A3ddfgh*A1dd*rpddfgh4;
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial inercial
if (rpddi(3)<=0)
    rpddi(3)=0;
    cinstpdd=rrddi(3)-rpddi(3);
    fbatpdd=0;
    if (rrddi(3)<=0.005)
        fbatpdd=kbatp*(0.005-rrddi(3));
    end
    fvpdd=kp*(hp-cinstpdd)+ fbatpdd;
end

```

```

if (rpddi(3)>0) % perda de contato com o solo
cinstpdd=rrddi(3)-rpddi(3);
fvpdd=0;
end
% Determinação do ângulo de câmber
ddd=r7ddc-rrddc;
auxddd=sqrt(ddd(2)^2+ddd(3)^2);
uddd=[0;
(ddd(2)/auxddd);
(ddd(3)/auxddd)];
gamadd=acos(uddd(3));
% ângulo de câmber em rad
fvpdd=fvpdd/(cos(gamadd));
% correção da força vertical devido ao ângulo de câmber

% SUSPENSÃO DIANTEIRA ESQUERDA
% Determinação dos valores das coordenadas de junta
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO) b11=q11;
% ângulo entre a bandeja e o chassis
aux11=jcmde^2+jbmde^2+2*jbmde*(jcgde*sin(b11)-jchde*cos(b11));
b12=pde-sqrt(aux11);
% deslocamento da mola ou amortecedor a partir da configuração de curso máximo do
amortecedor
b13=acos((jchde-jbmde*cos(b11))/(pde-b12));
% 2o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo + cubo da roda)
b14=atan2(jcfde,(-jbmde*sin(b11)-jcgde));
% 1o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo + cubo da roda)
b15=q12;
% 2o TRANSFORMADOR (DIREÇÃO)
b16=b12;
b17=b13;
b18=b14;
b19=0.3178-const_est*qvol;
% deslocamento linear da cremalheira % determinação de b20 - 3o ângulo de Euler do
corpo 3
a1de=2*fdmde*((clfde+f2de*b19)*cos(b18)+(clgde+g2de*b19)*sin(b18));
a2de=-2*fdmde
((clfde+f2de*b19)*sin(b18)*cos(b17)- (clgde+g2de*b19)
cos(b18)*cos(b17)-(clhde+h2de*b19)*sin(b17));

```

```

a3de=-clmde^2-(pde-b16-fbmde)^2
-fdmde^2+demde^2
- (f2de^2+g2de^2+h2de^2)*b19^2
-2*(clfde*f2de+clgde*g2de+clhde*h2de)*b19-2*(pde-b16-fbmde)
((clfde+f2de*b19)*sin(b18)*sin(b17)- (clgde+g2de*b19)
cos(b18)*sin(b17)+(clhde+h2de*b19)
cos(b17));
a4de=a1de^2+a2de^2
-a3de^2;
%discriminante da eq. do 2ograu que determina b20
if (a4de>=0)
x1de=(a1de*a3de+a2de*sqrt(a4de))/(a1de^2+a2de^2);
y1de=(a2de*a3de-a1de*sqrt(a4de))/(a1de^2
+a2de^2);
x2de=(a1de*a3de-a2de*sqrt(a4de))/(a1de^2+a2de^2);
y2de=(a2de*a3de+a1de*sqrt(a4de))/(a1de^2+a2de^2);
b20a=(pi/2)*(sign(y1de)-1)+acos(sign(y1de)*x1de);
b20b=(pi/2)*(sign(y2de)-1)+acos(sign(y2de)*x2de);
end b20=b20b;
% Determinação das matrizes seleção de entradas modificadas (V11m e V12m) e das
matrizes jacobianas das restrições Jb11 e Jb12 (informação da geometria da suspensão e
da direção)
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
V11m=[1 0
0 0
0 0
0 0
0 1];
jb1121=2*jbmde*(jcgde*cos(b11)+jchde*sin(b11));
jb1122=2*(-b12+pde);
jb1131=-jbmde*sin(b11)/(pde-b12);
jb1132=-(jchde-jbmde*cos(b11))/(pde-b12)^2;
jb1133=-sin(b13);
jb1141=-jcfde*jbmde*cos(b11)/(-jbmde*sin(b11)-jcgde)^2;
jb1144=1+(tan(b14))^2;
Jb11=[1 0 0 0 0
jb1121 jb1122 0 0 0
jb1131 jb1132 jb1133 0 0
jb1141 0 0 jb1144 0

```

```

0 0 0 0 1];
% 2o TRANSFORMADOR (DIREÇÃO)
V12m=[0 0
0 0
0 0
0 0
0 0];
jb1251=-2*pde+2*b16+2*fbmde- 2*(clfde+f2de*b19)*sin(b18)*sin(b17)+2
(clgde+g2de*b19)*cos(b18)*sin(b17)-2*(clhde+h2de*b19)*cos(b17);
jb1252=-2*fdmde*(- (clfde+f2de*b19)
sin(b18)*sin(b17)+(clgde+g2de*b19)*cos(b18)*sin(b17)- (clhde+h2de*b19)
cos(b17))*sin(b20)+(2*pde-2*b16- 2*fbmde)
((clfde+f2de*b19)*sin(b18)*cos(b17)-(clgde+g2de*b19)*cos(b18)*cos(b17)
- (clhde+h2de*b19)*sin(b17));
jb1253=2*fdmde*(-(clfde+f2de*b19)*sin(b18)+(clgde+g2de*b19)*cos(b18))*cos(b20)
- 2*fdmde*((clfde+f2de*b19)*cos(b18)*cos(b17)+(clgde+g2de*b19)*sin(b18)*cos(b17))*sin(b
20)
+2*(pde-b16- fbmde)*((clfde+f2de*b19)*cos(b18)*sin(b17)+(clgde+g2de*b19)*sin(b18)*sin(b17));
jb1254=2*fdmde*(f2de*cos(b18)+g2de*sin(b18))*cos(b20)- 2*fdmde
(f2de*sin(b18)*cos(b17)-g2de*cos(b18)*cos(b17)- h2de*sin(b17))*sin(b20)+2*(f2de^2
+g2de^2+h2de^2)*b19
+2*clfde*f2de+2*clgde*g2de+2*c lhde*h2de+(2*pde-2*b16
-2*fbmde)*(f2de*sin(b18)*sin(b17)- g2de*cos(b18)*sin(b17)
+h2de*cos(b17));
jb1255=-a1de*sin(b20)+a2de*cos(b20);
Jb12=[1 0 0 0 0
0 1 0 0 0
0 0 1 0 0
0 0 0 1 0
jb1251 jb1252 jb1253 jb1254
jb1255];
% ACOPLAMENTO DOS TRANSFORMADORES
V1m=[V11m;
V12m];
% matriz seleção de entradas modificada
C121=[0 -1 0 0 0
0 0 -1 0 0
0 0 0 -1 0
0 0 0 0 0

```

```

0 0 0 0 0];
Jbde=[Jb11 zeros(5);
C121 Jb12];
% matriz jacobiana beta de restrições
% Determinação da matriz jacobiana relativa do mecanismo (Jr)
Jrde=(inv(Jbde))*V1m;
% Determinação do vetor de velocidades das coordenadas de junta (db1)
db1=Jrde*[dq11;
dq12];
db11=db1(1);
db12=db1(2);
db13=db1(3);
db14=db1(4);
db15=db1(5);
db16=db1(6);
db17=db1(7);
db18=db1(8);
db19=db1(9);
db20=db1(10);
% Determinação da derivada da matriz jacobiana beta do mecanismo(DJbde)
djb1121=2*jbmde*(-jcgde*sin(b11)+jchde*cos(b11))*db11;
djb1122=-2*db12;
djb1131=-jbmde*(cos(b11)*(pde-b12)*db11+sin(b11)*db12)/(pde-b12)^2;
djb1132=-db11*jbmde*sin(b11)/(pde-b12)^2+2*db12*(-jchde+jbmde*cos(b11))/(pde-b12)^3;
djb1133=-(cos(b13))*db13;
djb1141=db11*(jcfde*jbmde*sin(b11)/(-jbmde*sin(b11)-jcgde)^2-2*jcfde
jbmde^2*cos(b11)^2
/(-jbmde*sin(b11)-jcgde)^3);
djb1144=2*tan(b14)*(1+(tan(b14))^2)*db14;
djb1251=2*db16;
djb1251=djb1251+(- (2*clfde+2*f2de*b19)*sin(b18)*cos(b17)+(2*clgde
+2*g2de*b19)*cos(b18)*cos(b17)+(2*clh de+2*h2de*b19)
sin(b17))*db17;
djb1251=djb1251+(-(2*clfde+2*f2de*b19)*cos(b18)*sin(b17)- (2*clgde+2*g2de*b19)
sin(b18)*sin(b17))*db18;
djb1251=djb1251+(-2*f2de*sin(b18)*sin(b17)+2*g2de*cos(b18)*sin(b17)- 2*h2de*cos(b17))*db19;
djb1252=(- 2*(clfde+f2de*b19)*sin(b18)*cos(b17)+2*(clgde+g2de*b19)*cos(b18)*cos(b17)+
2*(clhde+h 2de*b19)*sin(b17))*db16;

```

$$\begin{aligned}
 & \text{djb1252} = \text{djb1252} + (-2 * \text{fdmde} * ((-\text{clfde} - \text{f2de} * \text{b19}) * \sin(\text{b18}) \\
 & \cos(\text{b17}) + (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) \\
 & \cos(\text{b18}) * \cos(\text{b17}) + (\text{clhde} + \text{h2de} * \text{b19}) * \sin(\text{b17})) * \sin(\text{b20}) \\
 & + (2 * \text{pde} - 2 * \text{b16} - 2 * \text{fbmde}) * (- (\text{clfde} + \text{f2de} * \text{b19}) \\
 & \sin(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) + (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) - (\text{clhde} + \text{h2de} * \text{b19}) \\
 & \cos(\text{b17}))) * \text{db17}; \\
 & \text{djb1252} = \text{djb1252} + (-2 * \text{fdmde} * ((-\text{clfde} - \text{f2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) - (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) \\
 & \sin(\text{b18}) * \sin(\text{b17})) * \sin(\text{b20}) + (2 * \text{pde} - 2 * \text{b16} - 2 * \text{fbmde}) \\
 & ((\text{clfde} + \text{f2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) * \cos(\text{b17}) + (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) * \sin(\text{b18}) * \cos(\text{b17}))) * \text{db18}; \\
 & \text{djb1252} = \text{djb1252} + (-2 * \text{fdmde} * (-\text{f2de} * \sin(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) \\
 & + \text{g2de} * \cos(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) - \text{h2de} * \cos(\text{b17})) \\
 & \sin(\text{b20}) + (2 * \text{pde} - 2 * \text{b16} - 2 * \text{fbmde}) * (\text{f2de} * \sin(\text{b18}) * \cos(\text{b17}) - \text{g2de} * \cos(\text{b18}) \\
 & \cos(\text{b17}) - \text{h2de} * \sin(\text{b17}))) * \text{db19}; \\
 & \text{djb1252} = \text{djb1252} + (-2 * \text{fdmde} * ((-\text{clfde} - \text{f2de} * \text{b19}) * \sin(\text{b18}) \\
 & \sin(\text{b17}) + (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) - (\text{clhde} + \text{h2de} * \text{b19}) \\
 & \cos(\text{b17})) * \cos(\text{b20})) * \text{db20}; \\
 & \text{djb1253} = (-2 * (\text{clfde} + \text{f2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) - 2 * (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) \\
 & \sin(\text{b18}) * \sin(\text{b17})) * \text{db16}; \\
 & \text{djb1253} = \text{djb1253} + (-2 * \text{fdmde} * (- (\text{clfde} + \text{f2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) \\
 & \sin(\text{b17}) - (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) * \sin(\text{b18}) * \sin(\text{b17})) * \sin(\text{b20}) + (2 * \text{pde} - 2 * \text{b16} - 2 * \text{fbmde}) * ((\text{clfde} \\
 & + \text{f2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) * \cos(\text{b17}) + (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) * \sin(\text{b18}) * \cos(\text{b17}))) * \text{db17}; \\
 & \text{djb1253} = \text{djb1253} + (2 * \text{fdmde} * ((-\text{clfde} - \text{f2de} * \text{b19}) \\
 & \cos(\text{b18}) - (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) \\
 & \sin(\text{b18})) * \cos(\text{b20}) - 2 * \text{fdmde} * (- (\text{clfde} + \text{f2de} * \text{b19}) \\
 & \sin(\text{b18}) * \cos(\text{b17}) + (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) * \cos(\text{b17})) * \sin(\text{b20}) + (2 * \text{pde} - 2 * \text{b16} - 2 * \text{fbmde}) * (- \\
 & (\text{clfde} + \text{f2de} * \text{b19}) \\
 & \sin(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) + (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) * \sin(\text{b17}))) * \text{db18}; \\
 & \text{djb1253} = \text{djb1253} + (2 * \text{fdmde} * (-\text{f2de} * \sin(\text{b18}) + \text{g2de} * \cos(\text{b18})) * \cos(\text{b20}) - 2 * \text{fdmde} \\
 & (\text{f2de} * \cos(\text{b18}) * \cos(\text{b17}) + \text{g2de} * \sin(\text{b18}) * \cos(\text{b17})) \\
 & \sin(\text{b20}) + (2 * \text{pde} - 2 * \text{b16} - 2 * \text{fbmde}) * (\text{f2de} * \cos(\text{b18}) \\
 & \sin(\text{b17}) + \text{g2de} * \sin(\text{b18}) * \sin(\text{b17}))) * \text{db19}; \\
 & \text{djb1253} = \text{djb1253} + (-2 * \text{fdmde} * ((-\text{clfde} - \text{f2de} * \text{b19}) * \sin(\text{b18}) + (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18})) * \sin(\text{b20}) - \\
 & 2 * \text{fdmde} \\
 & ((\text{clfde} + \text{f2de} * \text{b19}) * \cos(\text{b18}) * \cos(\text{b17}) + (\text{clgde} + \text{g2de} * \text{b19}) * \sin(\text{b18}) * \cos(\text{b17})) * \cos(\text{b20})) * \text{db20}; \\
 & \text{djb1254} = (-2 * \text{f2de} * \sin(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) + 2 * \text{g2de} * \cos(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) - 2 * \text{h2de} * \cos(\text{b17})) * \text{db16}; \\
 & \text{djb1254} = \text{djb1254} + (-2 * \text{fdmde} * (-\text{f2de} * \sin(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) + \text{g2de} * \cos(\text{b18}) * \sin(\text{b17}) - \text{h2de} * \cos(\text{b17})) \\
 & \sin(\text{b20}) + (2 * \text{pde} - 2 * \text{b16} - 2 * \text{fbmde}) \\
 & (\text{f2de} * \sin(\text{b18}) * \cos(\text{b17}) - \text{g2de} * \cos(\text{b18}) * \cos(\text{b17}) - \text{h2de} * \sin(\text{b17}))) * \text{db17};
 \end{aligned}$$

```

djb1254=djb1254+(2*fdmde*(-f2de*sin(b18)+g2de
cos(b18))*cos(b20)- 2*fdmde*(f2de*cos(b18)*cos(b17)+g2de*sin(b18)*cos(b17))*sin(b20)+(2*pde-
2*b16- 2*fbmde)
(f2de*cos(b18)*sin(b17)+g2de*sin(b18)*sin(b17))*db18;
djb1254=djb1254+(2*f2de^2+2*g2de^2+2*h2de^2)*db19;
djb1254=djb1254+(-2*fdmde*(f2de*cos(b18)+g2de*sin(b18))*sin(b20)- 2*fdmde
(f2de*sin(b18)*cos(b17)-g2de*cos(b18)*cos(b17)- h2de*sin(b17))*cos(b20))*db20;
djb1255=(-2*fdmde*(- (clfde+f2de*b19)*sin(b18)*sin(b17)+(clgde+g2de*b19)
cos(b18)*sin(b17)- (clhde+h2de*b19)*cos(b17))*cos(b20))*db17;
djb1255=djb1255+(-2*fdmde*(- (clfde+f2de*b19)*sin(b18)+(clgde+g2de*b19)*cos(b18))
sin(b20)- 2*fdmde*((clfde+
f2de*b19)*cos(b18)*cos(b17)+(clgde+g2de*b19)*sin(b18)*cos(b17))*cos( b20))*db18;
djb1255=djb1255+(-2*fdmde*(f2de*cos(b18)+g2de*sin(b18))
sin(b20)- 2*fdmde*(f2de*sin(b18)*cos(b17)-g2de*cos(b18)*cos(b17)- h2de*sin(b17))*cos(b20))*db19;
djb1255=djb1255+(- 2*fdmde*((clfde+f2de*b19)*cos(b18)+(clgde+g2de*b19)*
sin(b18))*cos(b20)+2*fdmde*((clfd e+f2de*b19)*sin(b18)
cos(b17)-(clgde+g2de*b19)*cos(b18)*cos(b17)- (clhde+h2de*b19)*sin(b17))*sin(b20))*db20;
DJb11=[0 0 0 0 0
djb1121 djb1122 0 0 0
djb1131 djb1132 djb1133 0 0
djb1141 0 0 djb1144 0
0 0 0 0 0];
DJb12=[0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
djb1251 djb1252 djb1253 djb1254
djb1255];
DJbde=[DJb11 zeros(5);
zeros(5) DJb12];
% derivada da matriz jacobiana beta de restrições
% Determinação da derivada da matriz jacobiana relativa(DJrde)
djr121=(-djb1121*jb1122+jb1121*djb1122)/(jb1122)^2;
djr131=(-djb1131*jb1133+jb1131*djb1133)/jb1133^2;
djr131=djr131+(jb1122*jb1133*(jb1132*djb1121+djb1132*jb1121)-
jb1121*jb1132*(djb1133*jb1122+jb1133*djb1122))/(jb1133*jb1122)^2;
djr141=(-djb1141*jb1144+jb1141*djb1144)/jb1144^2;
djr161=djr121;
djr171=djr131;

```



```

djr181=djr141;
djr1101=(jb1144*jb1255*(djb1141*jb1253+jb1141*
djb1253)- jb1141*jb1253*(djb1144*jb1255+jb1144*djb1255))/(jb1144*jb1255)^2;
djr1101=djr1101+(jb1133*jb1255*(djb1131*jb1252+
jb1131*djb1252)- jb1131*jb1252*(djb1133*jb1255+jb1133*djb1255))/(jb1133*jb1255)^2;
djr1101=djr1101+(jb1122*jb1255*(djb1121*jb1251+jb1121*djb1251)- jb1121*jb1251*
(djb1122*jb1255+jb1122*djb1255))/(jb1122*jb1255)^2;
djr1101=djr1101- (jb1122*jb1133*jb1255*(djb1121*jb1132*jb1252+jb1121*
djb1132*jb1252+jb1121*jb1132*djb1252)- jb1121*jb1132*jb1252*(djb1122*jb1133*jb1255+jb1122*
djb1133*jb1255+jb1122*jb1133*djb1255))/(jb1122*jb1133*jb1255)^2;
% derivada da matriz jacobiana relativa
DJrde=[0 0
djr121 0
djr131 0
djr141 0
0 0
djr161 0
djr171 0
djr181 0
0 0
djr1101 0];
% CINEMÁTICA ABSOLUTA
% Posição e velocidade linear dos C.M. dos corpos em relação ao referencial do chassis
% Corpo 2 (bandeja)
A2defgh=[1 0 0
0 sin(b11) cos(b11)
0 -cos(b11) sin(b11)];
A2dec=Rode*A2defgh;% matriz transformação do corpo 2 para o referencial (XYZ)c
DA2defgh=db11*[0 0 0;0 cos(b11) -sin(b11);0 sin(b11) cos(b11)];
% derivada da matriz transformação do corpo 2 para o referencial (fgh)
DA2dec=Rode*DA2defgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 2 para o referencial (XYZ)c
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
A3defgh=[(cos(b18)*cos(b20)-sin(b18)*cos(b17)*sin(b20)) (-cos(b18)*sin(b20)-
sin(b18)*cos(b17)*cos(b20)) (sin(b18)*sin(b17)) (sin(b18)*cos(b20)+
cos(b18)*cos(b17)*sin(b20)) (- sin(b18)*sin(b20)+
cos(b18)*cos(b17)*cos(b20)) (-cos(b18)*sin(b17)) (sin(b17)*sin(b20)) (sin(b17)*cos(b20))
(cos(b17))];
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh)

```

```

A3dec=Rode*A3defgh;
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (XYZ)c
r3de=[0;
0;
hbmde];
% posição do C.M. em relação à junta esférica (ponto B)
r3dec=rrde+A2dec*[0;
-jbmde;
0]+A3dec*r3de;
% posição do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% derivada da matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh)
DA3defgh=db17*[sin(b18)*sin(b17)*sin(b20) sin(b18)*sin(b17)*
cos(b20) sin(b18)*cos(b17) -cos(b18)*sin(b17)*sin(b20)
-cos(b18)*sin(b17)*cos(b20) -cos(b18)*cos(b17)
cos(b17)*sin(b20) cos(b17)*cos(b20) -sin(b17)];
DA3defgh=DA3defgh+db18*[-sin(b18)*cos(b20)-cos(b18)*
cos(b17)*sin(b20) sin(b18)*sin(b20)-cos(b18)*cos(b17)*cos(b20) cos(b18)*
sin(b17) cos(b18)*cos(b20)-sin(b18)*cos(b17)*sin(b20) -cos(b18)*
sin(b20)- sin(b18)*cos(b17)*cos(b20) sin(b18)*sin(b17) 0 0 0];
DA3defgh=DA3defgh+db20*
cos(b18)*sin(b20)-sin(b18)*cos(b17)*cos(b20) - cos(b18)*cos(b20)+sin(b18)*
cos(b17)*sin(b20) 0 -sin(b18)*sin(b20)+cos(b18)*
cos(b17)*cos(b20) -sin(b18)*cos(b20)- cos(b18)*cos(b17)*sin(b20) 0
sin(b17)*cos(b20) -sin(b17)*sin(b20) 0
;
DA3dec=Rode*DA3defgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 3 para o referencial (XYZ)c
dr3dec=DA2dec*[0;
-jbmde;
0]+DA3dec*r3de;
% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c % Corpo 7 (roda
+ pneu)
A2de=[cos(b15) -sin(b15) 0;
0 0 1;
-sin(b15) -cos(b15) 0];
% matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4
A1de=[cos(ro1de)
-sin(ro1de)*cos(ro2de)
sin(ro1de)*sin(ro2de)

```

```

sin(ro1de) cos(ro1de)*cos(ro2de)
-cos(ro1de)*sin(ro2de)
0 sin(ro2de) cos(ro2de)];
% matriz transformação do referencial (fgh)4 para o referencial (fgh)2
A7defgh=A3defgh*A1de*A2de;
% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (fgh)
A7dec=Rode*A7defgh;
% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
r7de=[0;
0;
hgmde];
% posição do C.M. em relação ao referencial (fgh)2 (ponto H)
r7dec=rrde+A2dec*[0;-jbmde;0]+A3dec*r3de+A7dec*r7de;
% posição do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
DA2de=db15*[-sin(b15) -cos(b15) 0;0 0 0;-cos(b15) sin(b15) 0];
% derivada da matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4
DA7defgh=DA3defgh*A1de*A2de+A3defgh*A1de*DA2de;
DA7dec=Rode*DA7defgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
dr7dec=DA2dec*[0;-jbmde;0]+DA3dec*r3de+DA7dec*r7de;
% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% Jacobiana absoluta(Jade) em relação ao referencial da suspensão (fgh)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
a12de=[0;
-jbmde*cos(b11);
-jbmde*sin(b11)];
a22de=[0;
0;
0];
a32de=[0;
0;
0];
a42de=[0;
0;
0];
a52de=[0;
0;
0];
a62de=[0;

```

```
0;
0];
a72de=[hbmde*cos(b17)*sin(b18);
-hbmde*cos(b17)*cos(b18);
-hbmde*sin(b17)];
a82de=[hbmde*sin(b17)*cos(b18);
hbmde*sin(b17)*sin(b18);
0];
a92de=[0;
0;
0];
a102de=[0;
0;
0];
b12de=[0;
0;
0];
b22de=[0;
0;
0];
b32de=[0;
0;
0];
b42de=[0;
0;
0];
b52de=[0;
0;
0];
b62de=[0;
0;
0];
b72de=[cos(b18);
sin(b18);
0];
b82de=[0;
0;
1];
b92de=[0;
```

```

0;
0];
b102de=[sin(b17)*sin(b18);
-sin(b17)*cos(b18);
cos(b17)];
% Corpo 7 (roda + pneu) a13de=[0;
-jbmde*cos(b11);
-jbmde*sin(b11)];
a23de=[0;
0;
0];
a33de=[0;
0;
0];
a43de=[0;
0;
0];
a53de=[0;
0;
0];
a63de=[0;
0;
0];
a73de=[hbmde*cos(b17)*sin(b18)+(- sin(b18)*sin(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*
cos(ro2de)+sin(b18)*sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)* cos(ro2de)+
sin(b18)*cos(b17)*sin(ro2de))*hgmde -hbmde*cos(b17)*cos(b18)+(cos(b18)*sin(b17)*
sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)- cos(b18)*sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de)-
cos(b18)*cos(b17)*sin(ro2de))*hgmde -hbmde*sin(b17)+
(- cos(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)+cos(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de)-
sin(b17)*sin(ro2de))*hgmde];
a83de=[hbmde*sin(b17)*cos(b18)+(-(-sin(b18)*cos(b20)- cos(b18)*cos(b17)*
sin(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+(sin(b18)*sin(b20)- cos(b18)*cos(b17)*
cos(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de)+cos(b18)*sin(b17)*sin(ro2de))*
hgmde hbmde*sin(b17)*sin(b18)+(-(cos(b18)*cos(b20)- sin(b18)*cos(b17)*
sin(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+(-cos(b18)*sin(b20)- sin(b18)*cos(b17)*
cos(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de)+sin(b18)*sin(b17)*sin(ro2de))*hgmde 0];
a93de=[0;
0;
0];

```

```

a103de=[(-(-cos(b18)*sin(b20)-sin(b18)*cos(b17)*cos(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+
(- cos(b18)*cos(b20)+sin(b18)*cos(b17)*sin(b20))*
cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde (-(-sin(b18)*sin(b20)+cos(b18)*cos(b17)*cos(b20))*
sin(ro1de)*cos(ro2de)+(- sin(b18)*cos(b20)-cos(b18)*cos(b17)*sin(b20))*
cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde (-sin(b17)*cos(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)- sin(b17)*
sin(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde];
b13de=[0;
0;
0];
b23de=[0;
0;
0];
b33de=[0;
0;
0];
b43de=[0;
0;
0];
b53de=[-(cos(b18)*cos(b20)-sin(b18)*cos(b17)*sin(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+
(- cos(b18)*sin(b20)- sin(b18)*
cos(b17)*cos(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de)+sin(b18)*sin(b17)*sin(ro2de) -(sin(b18)*
cos(b20)+cos(b18)*cos(b17)*sin(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+(- sin(b18)*
sin(b20)+cos(b18)*cos(b17)*cos(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de)- cos(b18)*
sin(b17)*sin(ro2de)- sin(b17)*sin(b20)*
sin(ro1de)*cos(ro2de)+sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de)+
cos(b17)*sin(ro2de)];
b63de=[0;
0;
0];
b73de=[cos(b18);
sin(b18);
0];
b83de=[0;
0;
1];
b93de=[0;
0;
0];
b103de=[sin(b17)*sin(b18);

```

```

-sin(b17)*cos(b18);
cos(b17)];
% Jacobina absoluta (Jade)
Jade=[a12de a22de a32de a42de a52de a62de a72de a82de a92de a102de
b12de b22de b32de b42de b52de b62de b72de b82de b92de b102de
a13de a23de a33de a43de a53de a63de a73de a83de a93de a103de
b13de b23de b33de b43de b53de b63de b73de b83de b93de b103de];
% Derivada da Jacobiana absoluta(DJade) % Corpo 3 (manga do eixo + telescópico
inferior)
da12de=[0;
jbmde*sin(b11)*db11;
-jbmde*cos(b11)*db11];
da22de=[0;
0;
0];
da32de=[0;
0;
0];
da42de=[0;
0;
0];
da52de=[0;
0;
0];
da62de=[0;
0;
0];
da72de=[hbmde*(- sin(b17)*sin(b18)*db17+cos(b17)*cos(b18)*db18);
hbmde*(sin(b17)*cos(b18)*db17+cos(b17)*sin(b18)*db18);
-hbmde*cos(b17)*db17];
da82de=[hbmde*(cos(b17)*cos(b18)*db17- sin(b17)*sin(b18)*db18);
hbmde*(cos(b17)*sin(b18)*db17+sin(b17)*cos(b18)*db18);
0];
da92de=[0;
0;
0];
da102de=[0;
0;
0];

```

```
db12de=[0;
0;
0];
db22de=[0;
0;
0];
db32de=[0;
0;
0];
db42de=[0;
0;
0];
db52de=[0;
0;
0];
db62de=[0;
0;
0];
db72de=[-sin(b18)*db18;
cos(b18)*db18;
0];
db82de=[0;
0;
0];
db92de=[0;
0;
0];
db102de=[(cos(b17)*sin(b18)*db17+sin(b17)*cos(b18)*db18);
(-cos(b17)*cos(b18)*db17+sin(b17)*sin(b18)*db18);
-sin(b17)*db17];
% Corpo 7 (roda + pneu) da13de=[0;
jbmde*sin(b11)*db11;
-jbmde*cos(b11)*db11];
da23de=[0;
0;
0];
da33de=[0;
0;
0];
```



```

da43de=[0;
0;
0];
da53de=[0;
0;
0];
da63de=[0;
0;
0];
da73dex=db17*(-hbmde*sin(b17)*sin(b18)+(- sin(b18)*cos(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*
cos(ro2de)+sin(b18)*cos(b17)*cos(b20)*cos(ro1de) *cos(ro2de)-
sin(b18)*sin(b17)*sin(ro2de))*hgmde);
da73dex=da73dex+db18*(hbmde*cos(b17)*cos(b18)+(- cos(b18)*
sin(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)+cos(b18)*sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de) *
cos(ro2de)+cos(b18)*cos(b17)*sin(ro2de))*hgmde);
da73dex=da73dex+db20*((-sin(b18)*sin(b17)*cos(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)-
sin(b18)*sin(b17)*sin(b20)*cos(ro1de)*
cos(ro2de))*hgmde);
da73dey=db17*(hbmde*sin(b17)*cos(b18)+
(cos(b18)*cos(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro 2de)- cos(b18)*
cos(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de)+cos(b18)*sin(b17)*sin(ro2de))*hgmde );
da73dey=da73dey+db18*(hbmde*cos(b17)*sin(b18)+(- sin(b18)*
sin(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)+
sin(b18)*sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)* cos(ro2de)+sin(b18)*cos(b17)*sin(ro2de))*hgmde);
da73dey=da73dey+db20*((cos(b18)*sin(b17)*cos(b20)*
sin(ro1de)*cos(ro2de)+cos(b18)*si n(b17)*
sin(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde);
da73dez=db17*(-hbmde*cos(b17)+(sin(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)- sin(b17)*cos(b20)*
cos(ro1de)*cos(ro2de)-cos(b17)*sin(ro2de))*hgmde);
da73dez=da73dez+db20*((-cos(b17)*cos(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)- cos(b17)*sin(b20)*
cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde);
da73de=[da73dex;
da73dey;
da73dez];
da83dex=db17*(hbmde*cos(b17)*cos(b18)+(- cos(b18)*sin(b17)*
sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)+
cos(b18)*sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de) *cos(ro2de)+cos(b18)*cos(b17)*sin(ro2de))*hgmde);
da83dex=da83dex+db18*(-hbmde*sin(b17)*sin(b18)+((cos(b18)*cos(b20)- sin(b18)*
cos(b17)*

```

```

sin(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+(cos(b18)*sin(b20)+sin(b18)*cos(b17)* cos(b20))*
cos(ro1de)*
cos(ro2de)-sin(b18)*sin(b17)*sin(ro2de))*hgmde);
da83dex=da83dex+db20*((( - sin(b18)*sin(b20)+
cos(b18)*cos(b17)*cos(b20))*sin(ro1de)*
cos(ro2de)+(sin(b18)*cos(b20) +cos(b18)*cos(b17)*
sin(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde);
da83dey=db17*(hbmde*
cos(b17)*sin(b18)+(- sin(b18)*sin(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)+sin(b18)*
sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)*
cos(ro2de)+sin(b18)*cos(b17)*sin(ro2de))*hgmde);
da83dey=da83dey+db18*(hbmde*sin(b17)*cos(b18)+((sin(b18)*cos(b20)+cos(b18)*cos(b1
7)*sin(b20))*
sin(ro1de)*cos(ro2de)+(sin(b18)*sin(b20)- cos(b18)*cos(b17)*
cos(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de)+
cos(b18)*sin(b17)*sin(ro2de))*hgmde);
da83dey=da83dey+db20*(((cos(b18)*sin(b20)+sin(b18)*cos(b17)*cos(b20))*sin(ro1de)*
cos(ro2de)+(- cos(b18)*cos(b20)+sin(b18)*cos(b17)*sin(b20))*
cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde);
da83de=[da83dex;
da83dey;
0];
da93de=[0;
0;
0];
da103dex=db17*((-sin(b18)*sin(b17)*cos(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)- sin(b18)*
sin(b17)*sin(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde);
da103dex=da103dex+db18*((( - sin(b18)*sin(b20)+cos(b18)*cos(b17)*cos(b20))*
sin(ro1de)*cos(ro2de)+(sin(b18)*cos(b20) +cos(b18)*cos(b17)*sin(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de))*
hgmde);
da103dex=da103dex+db20*(((cos(b18)*cos(b20)- sin(b18)*cos(b17)*
sin(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+(cos(b18)*sin(b20)+sin(b18)*cos(b17)* cos(b20))*cos(ro1de)*
cos(ro2de))*hgmde);
da103dey=db17*((cos(b18)*sin(b17)*cos(b20)*sin(ro1de)*
cos(ro2de)+cos(b18)*sin(b17)*sin(b20)*
cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde);
da103dey=da103dey+db18*(((cos(b18)*sin(b20)+sin(b18)*
cos(b17)*cos(b20))*
sin(ro1de)* cos(ro2de)+(- cos(b18)*

```

```

cos(b20)+sin(b18)*cos(b17)*sin(b20))*cos(ro1de)*
cos(ro2de))*hgmde);
da103dey=da103dey+db20*(((sin(b18)*cos(b20)+cos(b18)*cos(b17)*sin(b20))*sin(ro1de)*
cos(ro2de)+(sin(b18)*sin(b20)-cos(b18)*cos(b17)*cos(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde);
da103dez=db17*(-cos(b17)*cos(b20)*sin(ro1de)*
cos(ro2de)-cos(b17)*sin(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde);
da103dez=da103dez+db20*((sin(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*
cos(ro2de)-sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de))*hgmde);
da103de=[da103dex;
da103dey;
da103dez];
db13de=[0;
0;
0];
db23de=[0;
0;
0];
db33de=[0;
0;
0];
db43de=[0;
0;
0];
db53dex=db17*(-sin(b18)*sin(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)+
sin(b18)*
sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de)+sin(b18)*cos(b17)*sin(ro2de));
db53dex=db53dex+db18*((sin(b18)*cos(b20)+cos(b18)*
cos(b17)*
sin(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+(sin(b18)*
sin(b20)-
cos(b18)*cos(b17)*cos(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de)+
cos(b18)*sin(b17)*sin(ro2de));
db53dex=db53dex+db20*((cos(b18)*sin(b20)+sin(b18)*
cos(b17)*
cos(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+(-cos(b18)*
cos(b20)+sin(b18)*cos(b17)*sin(b20))*
cos(ro1de)*cos(ro2de));
db53dey=db17*(cos(b18)*
sin(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)-cos(b18)*

```

```

sin(b17)*cos(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de)-cos(b18)*
cos(b17)*sin(ro2de));
db53dey=db53dey+db18*((- cos(b18)*cos(b20)+sin(b18)*cos(b17)*sin(b20))*
sin(ro1de)*cos(ro2de)+(- cos(b18)*sin(b20)- sin(b18)*
cos(b17)*cos(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de)+sin(b18)*sin(b17)*sin(ro2de));
db53dey=db53dey+db20*((sin(b18)*sin(b20)- cos(b18)*
cos(b17)*cos(b20))*sin(ro1de)*cos(ro2de)+(-sin(b18)*cos(b20)- cos(b18)*
cos(b17)*sin(b20))*cos(ro1de)*cos(ro2de));
db53dez=db17*(- cos(b17)*sin(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)+cos(b17)*
cos(b20)*cos(ro1de)*cos(ro2de)- sin(b17)*sin(ro2de));
db53dez=db53dez+
db20*(-sin(b17)*cos(b20)*sin(ro1de)*cos(ro2de)- sin(b17)*sin(b20)*
cos(ro1de)*cos(ro2de));
db53de=[db53dex;
db53dey;
db53dez];
db63de=[0;
0;
0];
db73de=[-sin(b18)*db18;
cos(b18)*db18;
0];
db83de=[0;
0;
0];
db93de=[0;
0;
0];
db103de=[(cos(b17)*sin(b18)*db17+sin(b17)*cos(b18)*db18);
(- cos(b17)*cos(b18)*db17+sin(b17)*sin(b18)*db18);
-sin(b17)*db17];
% Derivada da Jacobina absoluta (DJade)
DJade=[da12de da22de da32de da42de da52de da62de da72de da82de da92de da102de
db12de db22de db32de db42de db52de db62de db72de db82de db92de db102de da13de
da23de da33de da43de da53de da63de da73de da83de da93de da103de
db13de db23de db33de db43de db53de db63de db73de db83de db93de db103de];
% Determinação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) e sua derivada (Jgsde e
DJgsde)
Jgsde=Jade*Jrde;

```

```

DJgsde=DJade*Jrde+Jade*DJrde;
% Transformação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) para o referencial (XYZ)c
Jgcde=Roode*Jgsde;
%(12x2)
Jgde=[zeros(12,2) Jgcde
zeros(12,8)];
DJgcde=Roode*DJgsde;
DJgde=[zeros(12,2) DJgcde
zeros(12,8)];
%Submatrizes da matriz MKR
L3de=Ac*r3dec;
L3detil=[0 -L3de(3)
L3de(2);
L3de(3) 0
-L3de(1);
-L3de(2) L3de(1) 0];
% matriz antissimétrica de L3
K3de=[eye(3) -L3detil;
zeros(3) eye(3)];
R3de=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
L7de=Ac*r7dec;
L7detil=[0 -L7de(3) L7de(2);
L7de(3) 0 -L7de(1);
-L7de(2) L7de(1) 0];
% matriz antissimétrica de L7 K7de=[eye(3) -L7detil;
zeros(3) eye(3)];
R7de=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
%Derivada das submatrizes da matriz DMKR DL3de=Ac*dr3dec+DAc*r3dec;
DL3detil=[0 -DL3de(3) DL3de(2);
DL3de(3) 0 -DL3de(1);
-DL3de(2) DL3de(1) 0];
% matriz antissimétrica de DL3 DK3de=[zeros(3) -DL3detil;
zeros(3) zeros(3)];
DR3de=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
DL7de=Ac*dr7dec+DAc*r7dec;
DL7detil=[0 -DL7de(3) DL7de(2);

```

```

DL7de(3) 0 -DL7de(1);
-DL7de(2) DL7de(1) 0];
% matriz antissimétrica de DL7 DK7de=[zeros(3) -DL7detil;
zeros(3) zeros(3)];
DR7de=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
% Determinação do tensor de inércia de todos os corpos no referencial inercial
T3dei=(Ac*Rode*A3defgh)*T3dec*((A3defgh.')(Rode.')(Ac.));
T7dei=(Ac*Rode*A3defgh*A1de*A2de)*T7dec*((A2de.')(A1de.')(A3defgh.')(Rode.')(A
c.));
Tdei=[m3de*eye(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3) T3dei zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) m7de*eye(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3) T7dei];
% Determinação dos vetores de velocidades angulares dos corpos em relação ao referencial
inercial % Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
W3deitil=(Ac*DA3dec+DAc*A3dec)*((Ac*A3dec.));
W3deix=W3deitil(3,2);
W3deiy=W3deitil(1,3);
W3deiz=W3deitil(2,1);
W3dei=[W3deix;
W3deiy;
W3deiz];
% Corpo 7 (roda + pneu) W7deitil=(Ac*DA7dec+DAc*A7dec)*((Ac*A7dec.));
W7deix=W7deitil(3,2);
W7deiy=W7deitil(1,3);
W7deiz=W7deitil(2,1);
W7dei=[W7deix;
W7deiy;
W7deiz];
% Determinação do vetor de forças giroscópicas (bsde) bs3de=[zeros(3,1);
W3deitil*T3dei*W3dei];
bs7de=[zeros(3,1);
W7deitil*T7dei*W7dei];
bsde=[bs3de;
bs7de];
%Determinação da força da mola (Fmde)
if(escolhasusp == 1)
cinstde=ccompde-b12;
dmde=clivrede-cinstde;
fmde=kmde*dmde;

```

```

end
if(escolhasusp == 2)
dmde=b12;
fmde=2.388*10^4*exp(0.008647*dmde*1000)+50.58*
exp(0.05956*dmde*1000);
end
if(escolhasusp == 3)
dmde=b12;
fmde=9.9314*(2.388*10^4*
exp(0.008647*dmde*1000)+50.58*exp(0.05956*dmde*1000));
end
% Determinação da força do amortecedor (Fbde)
fade=bade*db12;
% Determinação da força vertical provocada pela deflexão do pneu (Fpde)
r7dei=rci+Ac*r7dec;
rrdefgh4=[0;
0;
-rroda];
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial (fgh)4
rrdec=r7dec+Rode*A3defgh*A1de*rrdefgh4;
rrdei=rci+Ac*rrdec;
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial inercial
rpdefgh4=[0;
0;
-rroda-hp];
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial (fgh)4
rpdei=r7dei+Ac*Rode*A3defgh*A1de*rpdefgh4;
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial inercial
if (rpdei(3)<=0)
rpdei(3)=0;
cinstpde=rrdei(3)-rpdei(3);
% deformação do pneu
fbatpde=0;
if (rrdei(3)<=0.005)
fbatpde=kbatp*(0.005-rrdei(3));
end
fvpde=kp*(hp-cinstpde)+ fbatpde;
end
if (rpdei(3)>0) % perda de contato com o solo

```

```

cinstpde=rrdei(3)-rpdei(3);
fvpde=0;
end
% Determinação do ângulo de câmber
dde=r7dec-rrdec;
auxdde=sqrt(dde(2)^2+dde(3)^2);
udde=[0;
(dde(2)/auxdde);
(dde(3)/auxdde)];
gamade=acos(udde(3));
% ângulo de câmber fvpde=fvpde/(cos(gamade));
% correção da força vertical devido ao ângulo de câmber
% SUSPENSÃO INTERMEDIARIA DIREITA % determinação dos valores das coordena-
das de junta
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
b21=q21;
% ângulo entre a bandeja e o chassis
aux21=jcmtd^2+jbmtd^2-2*jbmtd*(jcgtd*sin(b21)+jchtd*cos(b21));
b22=ptd-sqrt(aux21);
% deslocamento da mola ou amortecedor a partir da configuração de curso máximo do
amortecedor
b23=acos((jchtd-jbmtd*cos(b21))/(ptd-b22));
% 2o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo + cubo da roda)
b24=atan2(jcftd,(jbmtd*sin(b21)-jcgtd));
% 1o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo + cubo da roda)
b25=q22;
% 2o TRANSFORMADOR (DIREÇÃO)
b26=b22;
b27=b23;
b28=b24;
qvold=coefest*qvol;
b29=0.310921169+const_est*qvol*coefest;
% b29=0.3178+const_est*qvol*coefest;
% determinação de b30 - 3o ângulo de Euler do corpo 3
a1td=-2*fdmtd*((clftd-f2td*b29)*cos(b28)+(clgtd-g2td*b29)*sin(b28));
a2td=2*fdmtd*((clftd-f2td*b29)*sin(b28)*cos(b27)-(clgtd-g2td*b29)*cos(b28)*cos(b27)-
(clhtd-
h2td*b29)*sin(b27));
a3td=-clmtd^2-(ptd-b26-fbmtd)^2-
fdmtd^2+demtd^2- (f2td^2+

```



```

g2td^2+h2td^2)*b29^2+2*
(clftd*f2td+clgtd*g2td+clhtd*h2td)*b29-2*(ptd-b26-fbmtd)*((clftd-f2td*b29)*sin(b28)*sin(b27)-
(clgtd-g2td*b29)*cos(b28)*sin(b27)+(clhtd- h2td*b29)*cos(b27));
a4td=a1td^2+a2td^2-a3td^2;
%discriminante da eq. do 2ograu que determina b30
if (a4td>=0)
x1td=(a1td*a3td+a2td*sqrt(a4td))/(a1td^2+
a2td^2);
y1td=(a2td*a3td-a1td*sqrt(a4td))/
(a1td^2+a2td^2);
% x2td=(a1td*a3td-a2td*sqrt(a4td))/
(a1td^2+a2td^2);
%y2td=(a2td*a3td+a1td*sqrt(a4td))/(a1td^2+a2td^2);
b30a=(pi/2)*(sign(y1td)-1)+acos(sign(y1td)*x1td);
%b30b=(pi/2)*(sign(y2td)-1)+acos(sign(y2td)*x2td);
end
b30=b30a;
% determinação das matrizes seleção de entradas modificadas (V21m e V22m) e das
matrizes jacobianas das restrições Jb21 e Jb22 (informação da geometria da suspensão e
da direção)
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
V21m=[1 0
0 0
0 0
0 0
0 1];
jb2121=2*jbmtd*(jcgtd*cos(b21)-jchtd*sin(b21));
jb2122=2*(b22-ptd);
jb2131=-jbmtd*sin(b21)/(ptd-b22);
jb2132=-(jchtd-jbmtd*cos(b21))/
(ptd-b22)^2;
jb2133=-sin(b23);
jb2141=jcftd*jbmtd*cos(b21)/(jbmtd*sin(b21)-jcgtd)^2;
jb2144=1+(tan(b24))^2;
Jb21=[1 0 0 0 0 % matriz jacobiana beta de restrições
jb2121 jb2122 0 0 0
jb2131 jb2132 jb2133 0 0
jb2141 0 0 jb2144 0

```

```

0 0 0 0 1];
% 2o TRANSFORMADOR (DIREÇÃO)
V22m=[0 0
0 0
0 0
0 0
0 0];
jb2251=-2*(ptd-b26-fbmtd)-2*((clftd-f2td*b29)*sin(b28)*
sin(b27)-(clgtd- g2td*b29)*cos(b28)*
sin(b27)+(clhtd-h2td*b29)*cos(b27));
jb2252=2*sin(b30)*fdmtd*(-(clftd-f2td*b29)*sin(b28)*
sin(b27)+(clgtd- g2td*b29)*cos(b28)*sin(b27)-(clhtd-h2td*b29)*cos(b27))+
2*(ptd-b26-fbmtd)*((clftd- f2td*b29)*sin(b28)*
cos(b27)-(clgtd-g2td*b29)*cos(b28)*cos(b27)-(clhtd- h2td*b29)*sin(b27));
jb2253=-2*fdmtd*(-(clftd-f2td*b29)*sin(b28)+(clgtd- g2td*b29)*cos(b28))*
cos(b30)+2*fdmtd*((clftd-f2td*b29)*cos(b28)*cos(b27)+(clgtd- g2td*b29)*sin(b28)*
cos(b27))*sin(b30)+2*(ptd-b26-fbmtd)*((clftd- f2td*b29)*cos(b28)*
sin(b27)+(clgtd-g2td*b29)*sin(b28)*sin(b27));
jb2254=-2*fdmtd*(-f2td*cos(b28)-g2td*sin(b28))*cos(b30)+2*fdmtd*(- f2td*sin(b28)*cos(b27)+
g2td*cos(b28)*cos(b27)+h2td*sin(b27))*sin(b30)+2*(f2td^2+g2td^2 +h2td^2)*
b29-2*(clftd*f2td+clgtd*g2td+clhtd*h2td)+2*(ptd-b26-fbmtd)*(- f2td*sin(b28)*
sin(b27)+g2td*cos(b28)*sin(b27)-h2td*cos(b27));
jb2255=-a1td*sin(b30)+a2td*cos(b30);
Jb22=[1 0 0 0 0
0 1 0 0 0
0 0 1 0 0
0 0 0 1 0
jb2251 jb2252 jb2253 jb2254 jb2255];
% ACOPLAMENTO DOS TRANSFORMADORES
V2m=[V21m;
V22m];
% matriz seleção de entradas modificada
C221=[0 -1 0 0 0
0 0 -1 0 0
0 0 0 -1 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0];
Jbtd=[Jb21 zeros(5);
C221 Jb22];

```

```

% matriz jacobiana beta de restrições
% determinação da matriz jacobiana relativa do mecanismo (Jr)
Jrtd=(inv(Jbtd))*V2m;
% determinação do vetor de velocidades das coordenadas de junta (db2)
db2=Jrtd*[dq21;
dq22];
db21=db2(1);
db22=db2(2);
db23=db2(3);
db24=db2(4);
db25=db2(5);
db26=db2(6);
db27=db2(7);
db28=db2(8);
db29=db2(9);
db30=db2(10);
% determinação da derivada da matriz jacobiana beta do mecanismo(DJbtd)
djb2121=2*jbmtd*(-jcgtd*sin(b21)-jchtd*cos(b21))*db21;
djb2122=2*db22;
djb2131=-jbmtd*(cos(b21)*(ptd-b22)*db21+sin(b21)*db22)/
(ptd-b22)^2;
djb2132=(-jbmtd*sin(b21)*
(ptd-b22)*db21-2*(jchtd-jbmtd*cos(b21))*db22)/(ptd-b22)^3;
djb2133=-(cos(b23))*db23;
djb2141=-jcgtd*(jbmtd*sin(b21)*(jbmtd*sin(b21)-
jcgtd)+2*jbmtd^2*(cos(b21))^2)*db21/
(jbmtd*sin(b21)-jcgtd)^3;
djb2144=2*tan(b24)*
(1+(tan(b24))^2)*db24;
djb2251=2*db26;
djb2251=djb2251+(-2*(clftd-f2td*b29)*sin(b28)*cos(b27)+
2*(clgtd- g2td*b29)*cos(b28)*cos(b27)+2*(clhtd-h2td*b29)*sin(b27))*db27;
djb22251=djb2251+(-2*(clftd-f2td*b29)*cos(b28)*sin(b27)-2*
(clgtd- g2td*b29)*sin(b28)*sin(b27))*db28;
djb2251=djb2251+(2*f2td*sin(b28)*sin(b27)- 2*g2td*cos(b28)*
sin(b27)+2*h2td*cos(b27))*db29;
djb2252=(-2*(clftd-f2td*b29)*sin(b28)*cos(b27)+2*
(clgtd- g2td*b29)*cos(b28)*cos(b27)+2*(clhtd-h2td*b29)*sin(b27))*db26;
djb2252=djb2252+(2*sin(b30)*fdmtd*((-clftd+f2td*b29)*

```

$$\begin{aligned}
 & \sin(b28)*\cos(b27)+(clgtd- g2td*b29)*\cos(b28)* \\
 & \cos(b27)+(clhtd-h2td*b29)*\sin(b27))+(2*ptd-2*b26-2*fbmtd)*(-clftd- f2td*b29)*\sin(b28)* \\
 & \sin(b27)+(clgtd-g2td*b29)*\cos(b28)*\sin(b27)-(clhtd- \\
 & h2td*b29)*\cos(b27))) *db27; \\
 & djb2252=djb2252+(2*\sin(b30)*fdmtd*((-clftd+f2td*b29)*\cos(b28)* \\
 & \sin(b27)-(clgtd- g2td*b29)*\sin(b28)* \\
 & \sin(b27))+(2*ptd-2*b26-2*fbmtd)*((clftd- f2td*b29)*\cos(b28)* \\
 & \cos(b27)+(clgtd-g2td*b29)*\sin(b28)*\cos(b27))) *db28; \\
 & djb2252=djb2252+(2*\sin(b30)*fdmtd*(f2td*\sin(b28)* \\
 & \sin(b27)- g2td*\cos(b28)*\sin(b27)+h2td*\cos(b27)))+(2*ptd-2*b26- \\
 & 2*fbmtd)*(- f2td*\sin(b28)*\cos(b27)+g2td*\cos(b28)*\cos(b27)+h2td* \\
 & \sin(b27))) *db29; \\
 & djb2252=djb2252+(2*\cos(b30)*fdmtd*((-clftd+f2td*b29)* \\
 & \sin(b28)*\sin(b27)+(clgtd- g2td*b29)*\cos(b28)* \\
 & \sin(b27)-(clhtd-h2td*b29)*\cos(b27))) *db30; \\
 & djb2253=(-2*(clftd-f2td*b29)*\cos(b28)*\sin(b27)-2* \\
 & (clgtd- g2td*b29)*\sin(b28)*\sin(b27))) *db26; \\
 & djb2253=djb2253+(2*fdmtd*((-clftd-f2td*b29)*\cos(b28)* \\
 & \sin(b27)-(clgtd- g2td*b29)*\sin(b28)* \\
 & \sin(b27))*\sin(b30)+(2*ptd-2*b26-2*fbmtd)*((clftd- f2td*b29)*\cos(b28)*\cos(b27)+(clgtd- \\
 & g2td*b29)*\sin(b28)* \\
 & \cos(b27))) *db27; \\
 & djb2253=djb2253+(-2*fdmtd*((-clftd+f2td*b29)*\cos(b28)- \\
 & (clgtd- g2td*b29)*\sin(b28))*\cos(b30)+2*fdmtd*((-clftd-f2td*b29)* \\
 & \sin(b28)*\cos(b27)+(clgtd- g2td*b29)*\cos(b28)* \\
 & \cos(b27))*\sin(b30)+(2*ptd-2*b26-2*fbmtd)*(-clftd- f2td*b29)*\sin(b28)* \\
 & \sin(b27)+(clgtd-g2td*b29)*\cos(b28)*\sin(b27))) *db28; \\
 & djb2253=djb2253+(-2*fdmtd*(f2td*\sin(b28)-g2td*\cos(b28))* \\
 & \cos(b30)+2*fdmtd*(- f2td*\cos(b28)*\cos(b27)- \\
 & g2td*\sin(b28)*\cos(b27))*\sin(b30)+(2*ptd-2*b26-2*fbmtd)*(- f2td*\cos(b28)* \\
 & \sin(b27)-g2td*\sin(b28)*\sin(b27))) *db29; \\
 & djb2253=djb2253+(2*fdmtd*((-clftd+f2td*b29)*\sin(b28)+ \\
 & (clgtd- g2td*b29)*\cos(b28))*\sin(b30)+2*fdmtd*((clftd-f2td*b29)* \\
 & \cos(b28)*\cos(b27)+(clgtd- g2td*b29)* \\
 & \sin(b28)*\cos(b27))*\cos(b30))) *db30; \\
 & djb2254=(2*f2td*\sin(b28)*\sin(b27)-2*g2td*\cos(b28)*\sin(b27)+2*h2td*\cos(b27)) *db26; \\
 & djb2254=djb2254+(2*\sin(b30)*fdmtd*(f2td*\sin(b28)*\sin(b27)- g2td*\cos(b28)* \\
 & \sin(b27)+h2td*\cos(b27)))+(2*ptd-2*b26-2*fbmtd)*(- f2td*\sin(b28)* \\
 & \cos(b27)+g2td*\cos(b28)*\cos(b27)+h2td*\sin(b27))) *db27;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{djb2254} = \text{djb2254} + (-2 * \text{fdmtd} * (\text{f2td} * \sin(\text{b28}) - \text{g2td} * \cos(\text{b28})) * \cos(\text{b30}) + 2 * \text{fdmtd} * (-\text{f2td} * \cos(\text{b28}) * \\
 & \cos(\text{b27}) - \text{g2td} * \sin(\text{b28}) * \cos(\text{b27})) * \sin(\text{b30}) + (2 * \text{ptd} - 2 * \text{b26} - 2 * \text{fbmtd}) * (- \\
 & \text{f2td} * \cos(\text{b28}) * \sin(\text{b27}) - \text{g2td} * \sin(\text{b28}) * \sin(\text{b27}))) * \text{db28}; \\
 & \text{djb2254} = \text{djb2254} + (2 * \text{f2td}^2 + \\
 & 2 * \text{g2td}^2 + 2 * \text{h2td}^2) * \\
 & \text{db29}; \\
 & \text{djb2254} = \text{djb2254} + (2 * \text{fdmtd} * (-\text{f2td} * \cos(\text{b28}) - \text{g2td} * \sin(\text{b28})) * \\
 & \sin(\text{b30}) + 2 * \text{fdmtd} * (-\text{f2td} * \sin(\text{b28}) * \cos(\text{b27}) + \\
 & \text{g2td} * \cos(\text{b28}) * \cos(\text{b27}) + \text{h2td} * \sin(\text{b27})) * \cos(\text{b30})) * \text{db30}; \\
 & \text{djb2255} = (2 * \text{fdmtd} * (-\text{clftd} - \text{f2td} * \text{b29}) * \sin(\text{b28}) * \sin(\text{b27}) + \\
 & (\text{clgtd} - \text{g2td} * \text{b29}) * \cos(\text{b28}) * \sin(\text{b27}) - (\text{clhtd} - \text{h2td} * \text{b29}) * \cos(\text{b27})) * \cos(\text{b30})) * \text{db27}; \\
 & \text{djb2255} = \text{djb2255} + (2 * \text{fdmtd} * (-\text{clftd} - \text{f2td} * \text{b29}) * \sin(\text{b28}) + (\text{clgtd} - \text{g2td} * \text{b29}) * \cos(\text{b28})) * \\
 & \sin(\text{b30}) + 2 * \text{fdmtd} * ((\text{clftd} - \text{f2td} * \text{b29}) * \cos(\text{b28}) * \cos(\text{b27}) + (\text{clgtd} - \text{g2td} * \text{b29}) * \sin(\text{b28}) * \\
 & \cos(\text{b27})) * \cos(\text{b30})) * \text{db28}; \\
 & \text{djb2255} = \text{djb2255} + (2 * \text{fdmtd} * (-\text{f2td} * \cos(\text{b28}) - \text{g2td} * \sin(\text{b28})) * \\
 & \sin(\text{b30}) + 2 * \text{fdmtd} * (-\text{f2td} * \sin(\text{b28}) * \cos(\text{b27}) + \\
 & \text{g2td} * \cos(\text{b28}) * \cos(\text{b27}) + \text{h2td} * \sin(\text{b27})) * \\
 & \cos(\text{b30})) * \text{db29}; \\
 & \text{djb2255} = \text{djb2255} + (2 * \text{fdmtd} * ((\text{clftd} - \text{f2td} * \text{b29}) * \cos(\text{b28}) + (\text{clgtd} - \text{g2td} * \text{b29}) * \sin(\text{b28})) * \\
 & \cos(\text{b30}) - 2 * \text{fdmtd} * ((\text{clftd} - \text{f2td} * \text{b29}) * \sin(\text{b28}) * \cos(\text{b27}) - (\text{clgtd} - \text{g2td} * \text{b29}) * \cos(\text{b28}) * \\
 & \cos(\text{b27}) - (\text{clhtd} - \text{h2td} * \text{b29}) * \sin(\text{b27})) * \sin(\text{b30})) * \text{db30}; \\
 & \text{DJb21} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 & \text{djb2121} \ \text{djb2122} \ 0 \ 0 \ 0 \\
 & \text{djb2131} \ \text{djb2132} \ \text{djb2133} \ 0 \ 0 \\
 & \text{djb2141} \ 0 \ 0 \ \text{djb2144} \ 0 \\
 & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; \\
 & \text{DJb22} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 & 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 & \text{djb2251} \ \text{djb2252} \ \text{djb2253} \ \text{djb2254} \ \text{djb2255}]; \\
 & \text{DJbtd} = [\text{DJb21} \ \text{zeros}(5); \\
 & \text{zeros}(5) \ \text{DJb22}]; \\
 & \text{djr221} = (-\text{djb2121} * \text{jb2122} + \text{jb2121} * \text{djb2122}) / (\text{jb2122})^2; \\
 & \text{djr231} = (-\text{djb2131} * \text{jb2133} + \text{jb2131} * \text{djb2133}) / \text{jb2133}^2; \\
 & \text{djr231} = \text{djr231} + (\text{jb2122} * \text{jb2133} * (\text{jb2132} * \text{djb2121} + \text{djb2132} * \\
 & \text{jb2121}) - \text{jb2121} * \text{jb2132} * (\text{djb2133} * \text{jb2122} + \text{jb2133} * \text{djb2122})) / (\text{jb2133} * \\
 & \text{jb2122})^2; \\
 & \text{djr241} = (-\text{djb2141} * \text{jb2144} + \text{jb2141} * \text{djb2144}) / \text{jb2144}^2;
 \end{aligned}$$

```

djr261=djr221;
djr271=djr231;
djr281=djr241;
djr2101=(jb2144*jb2255*(djb2141*jb2253+jb2141*djb2253)- jb2141*jb2253*
(djb2144*jb2255+jb2144*djb2255))/(jb2144*jb2255)^2;
djr2101=djr2101+(jb2133*jb2255*(djb2131*jb2252+jb2131*
djb2252)- jb2131*jb2252*(djb2133*jb2255+jb2133*djb2255))/(jb2133*
jb2255)^2;
djr2101=djr2101+(jb2122*jb2255*(djb2121*jb2251+jb2121*
djb2251)- jb2121*jb2251*(djb2122*jb2255+jb2122*djb2255))/(jb2122*
jb2255)^2;
djr2101=djr2101- (jb2122*jb2133*jb2255*(djb2121*jb2132*jb2252+jb2121*
djb2132*jb2252+jb2121*jb2132*djb2252)-
jb2121*jb2132*jb2252*(djb2122*jb2133*jb2255+jb2122*djb2133*jb2255+jb2122*jb2133*
djb2255))/(jb2122*jb2133*jb2255)^2;
D.Jrtd=[0 0
djr221 0
djr231 0
djr241 0
0 0
djr261 0
djr271 0
djr281 0
0 0
djr2101 0];

```

% CINEMÁTICA ABSOLUTA

% Posição e velocidade linear dos C.M. dos corpos em relação ao referencial do chassis

% Corpo 2 (bandeja)

```
A2tdfgh=[1 0 0
```

```
0 sin(b21) -cos(b21)
```

```
0 cos(b21) sin(b21)];
```

```
A2tdc=Rotd*A2tdfgh;
```

```
DA2tdfgh=db21*[0 0 0;0 cos(b21) sin(b21);0 -sin(b21) cos(b21)];
```

```
DA2tdc=Rotd*DA2tdfgh;
```

% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)

```
A3tdfgh=[(cos(b28)*cos(b30)-sin(b28)*cos(b27)*sin(b30))
```

```
(-cos(b28)*sin(b30)- sin(b28)*cos(b27)*cos(b30)) (sin(b28)*sin(b27))
```

```
(sin(b28)*cos(b30)+cos(b28)*cos(b27)*sin(b30))
```

```

(- sin(b28)*sin(b30)+cos(b28)*cos(b27)*cos(b30))
(-cos(b28)*sin(b27)) (sin(b27)*sin(b30)) (sin(b27)*cos(b30))
(cos(b27));
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh)
A3tdc=Rotd*A3tdfgh;
r3td=[0;
0;
hbmtd];
% posição do C.M. em relação à junta esférica (ponto B)
r3tdc=rrtd+A2tdc*[0;jbmtd;0]+A3tdc*r3td;
DA3tdfgh=db27*[sin(b28)*sin(b27)*sin(b30) sin(b28)*sin(b27)*cos(b30) sin(b28)*cos(b27)
-cos(b28)*sin(b27)*sin(b30) -cos(b28)*sin(b27)*cos(b30) -cos(b28)*cos(b27) cos(b27)*sin(b30)
cos(b27)*cos(b30) -sin(b27)];
DA3tdfgh=DA3tdfgh+db28*[-sin(b28)*cos(b30)-cos(b28)*cos(b27)*sin(b30) sin(b28)*
sin(b30)-cos(b28)*cos(b27)*cos(b30) cos(b28)*sin(b27) cos(b28)*
cos(b30)-sin(b28)*cos(b27)*sin(b30) -cos(b28)*sin(b30)- sin(b28)*
cos(b27)*cos(b30) sin(b28)*sin(b27) 0 0 0];
DA3tdfgh=DA3tdfgh+db30*[-cos(b28)*sin(b30)-sin(b28)*
cos(b27)*cos(b30) - cos(b28)*cos(b30)+
sin(b28)*cos(b27)*sin(b30) 0 -sin(b28)*sin(b30)+
cos(b28)*cos(b27)*cos(b30) -sin(b28)*cos(b30)- cos(b28)*cos(b27)*
sin(b30) 0 sin(b27)*cos(b30) -sin(b27)*sin(b30) 0];
DA3tdc=Rotd*DA3tdfgh;
dr3tdc=DA2tdc*[0;jbmtd;0]+DA3tdc*r3td;% velocidade linear do C.M. em relação ao
referencial do chassis (XYZ)c
% Corpo 7 (roda + pneu)
A2td=[cos(b25) sin(b25) 0;
0 0 1;
sin(b25) -cos(b25) 0];% matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4
A1td=[cos(ro1td) -sin(ro1td)*
cos(ro2td) sin(ro1td)*sin(ro2td) sin(ro1td)
cos(ro1td)*cos(ro2td) -cos(ro1td)*sin(ro2td) 0 sin(ro2td) cos(ro2td)];% matriz transforma-
ção do referencial (fgh)4 para o referencial (fgh)2
A7tdfgh=A3tdfgh*A1td*A2td;% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (fgh)
A7tdc=Rotd*A7tdfgh;% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
r7td=[0;
0;
hgmtd];% posição do C.M. em relação ao referencial (fgh)2 (ponto H)
r7tdc=rrtd+A2tdc*[0;jbmtd;0]+A3tdc*r3td+A7tdc*r7td;% posição do C.M. em relação

```

```

ao referencial do chassis (XYZ)c
DA2td=db25*[-sin(b25) cos(b25) 0;
0 0 0;
cos(b25) sin(b25) 0]; % derivada da matriz transformação do referencial (fgh)5 para o
referencial (fgh)4
DA7tdfgh=DA3tdfgh*A1td*A2td+A3tdfgh*A1td*DA2td;
DA7tdc=Rotd*DA7tdfgh;% derivada da matriz transformação do corpo 7 para o referencial
(XYZ)c
dr7tdc=DA2tdc*[0;
jbmtd;
0]+DA3tdc*r3td+DA7tdc*r7td;% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do
chassis (XYZ)c
% Jacobiana absoluta(Jatd) em relação ao referencial da suspensão (fgh)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
a12td=[0;
jbmtd*cos(b21);
-jbmtd*sin(b21)];
a22td=[0;
0;
0];
a32td=[0;
0;
0];
a42td=[0;
0;
0];
a52td=[0;
0;
0];
a62td=[0;
0;
0];
a72td=[hbmtd*cos(b27)*sin(b28);
-hbmtd*cos(b27)*cos(b28);
-hbmtd*sin(b27)];
a82td=[hbmtd*sin(b27)*cos(b28);
hbmtd*sin(b27)*sin(b28);
0];
a92td=[0;

```



```
0;
0];
a102td=[0;
0;
0];
b22td=[0;
0;
0];
b22td=[0;
0;
0];
b32td=[0;
0;
0];
b42td=[0;
0;
0];
b52td=[0;
0;
0];
b62td=[0;
0;
0];
b72td=[cos(b28);
sin(b28);
0];
b82td=[0;
0;
1];
b92td=[0;
0;
0];
b102td=[sin(b27)*sin(b28);
-sin(b27)*cos(b28);
cos(b27)];
% Corpo 7 (roda + pneu) a13td=[0;
jbmt*d*cos(b21);
-jbmt*d*sin(b21)];
a23td=[0;
```

```

0;
0];
a33td=[0;
0;
0];
a43td=[0;
0;
0];
a53td=[0;
0;
0];
a63td=[0;
0;
0];
a73td=[hbmt*d*cos(b27)*sin(b28)- hgmd*
sin(b28)*sin(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+hgmd*sin(b28)*sin(b27)*
cos(b30) *cos(ro1td)*cos(ro2td)+hgmd*sin(b28)*cos(b27)*
sin(ro2td) -hbmt*d*cos(b27)*cos(b28)+hgmd*cos(b28)*sin(b27)*
sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)- hgmd*cos(b28)*
sin(b27)*cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td)- hgmd*cos(b28)*
cos(b27)*sin(ro2td) -hbmt*d*sin(b27)- hgmd*cos(b27)*
sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+hgmd*cos(b27)*cos(b30)*cos(ro1td)*
cos(ro2td)-hgmd*sin(b27)*sin(ro2td)];
a83td=[hbmt*d*
sin(b27)*cos(b28)+hgmd*((sin(b28)*cos(b30)+cos(b28)*cos(b27)*sin(b30)) *sin(ro1td)*
cos(ro2td)+(sin(b28)*sin(b30)- cos(b28)*cos(b27)*
cos(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td)+cos(b28)*sin(b27)*sin(ro2td)) hbmt*d*sin(b27)*
sin(b28)+hgmd*((- cos(b28)*cos(b30)+sin(b28)*cos(b27)*sin(b30))*
sin(ro1td)*cos(ro2td)+(-cos(b28)*sin(b30)- sin(b28)*cos(b27)*
cos(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td)+sin(b28)*sin(b27)*sin(ro2td)) 0];
a93td=[0;
0;
0];
a103td=[hgmd*((cos(b28)*sin(b30)+sin(b28)*cos(b27)*cos(b30))*
sin(ro1td)*cos(ro2td)+(- cos(b28)*cos(b30)+
sin(b28)*cos(b27)*sin(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td)) hgmd*((sin(b28)*
sin(b30)-cos(b28)*cos(b27)*cos(b30))*sin(ro1td)*cos(ro2td)+(- sin(b28)*
cos(b30)-cos(b28)*cos(b27)*sin(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td)) hgmd*(-sin(b27)*cos(b30)*
sin(ro1td)*cos(ro2td)- sin(b27)*sin(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td))];

```

```

b23td=[0;
0;
0];
b23td=[0;
0;
0];
b33td=[0;
0;
0];
b43td=[0;
0;
0];
b53td=[(cos(b28)*cos(b30)-sin(b28)*cos(b27)*sin(b30))*sin(ro1td)*cos(ro2td)-
(- cos(b28)*sin(b30)-sin(b28)*cos(b27)*cos(b30))*
cos(ro1td)*cos(ro2td)- sin(b28)*sin(b27)*sin(ro2td) (sin(b28)*
cos(b30)+cos(b28)*cos(b27)*sin(b30))*sin(ro1td)*cos(ro2td)-(- sin(b28)*
sin(b30)+cos(b28)*cos(b27)*cos(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td)+cos(b28)*
sin(b27)*s in(ro2td) sin(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)-sin(b27)*
cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td)- cos(b27)*sin(ro2td)];
b63td=[0;
0;
0];
b73td=[cos(b28);
sin(b28);
0];
b83td=[0;
0;
1];
b93td=[0;
0;
0];
b103td=[sin(b27)*sin(b28);
-sin(b27)*cos(b28);
cos(b27)];
% Jacobina absoluta (Jatd) Jatd=[a12td a22td a32td a42td a52td a62td a72td a82td
a92td a102td
b22td b22td b32td b42td b52td b62td b72td b82td b92td b102td
a13td a23td a33td a43td a53td a63td a73td a83td a93td a103td
b23td b23td b33td b43td b53td b63td b73td b83td b93td b103td];

```

```
% derivada da Jacobiana absoluta(DJatd)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
da12td=[0;
-jbmtd*sin(b21)*db21;
-jbmtd*cos(b21)*db21];
da22td=[0;
0;
0];
da32td=[0;
0;
0];
da42td=[0;
0;
0];
da52td=[0;
0;
0];
da62td=[0;
0;
0];
da72td=[hbmtd*(- sin(b27)*sin(b28)*db27+cos(b27)*cos(b28)*db28);
hbmtd*(sin(b27)*cos(b28)*db27+cos(b27)*sin(b28)*db28);
-hbmtd*cos(b27)*db27];
da82td=[hbmtd*(cos(b27)*cos(b28)*db27- sin(b27)*sin(b28)*db28);
hbmtd*(cos(b27)*sin(b28)*db27+sin(b27)*cos(b28)*db28);
0];
da92td=[0;
0;
0];
da102td=[0;
0;
0];
db22td=[0;
0;
0];
db22td=[0;
0;
0];
db32td=[0;
```

```
0;
0];
db42td=[0;
0;
0];
db52td=[0;
0;
0];
db62td=[0;
0;
0];
db72td=[-sin(b28)*db28;
cos(b28)*db28;
0];
db82td=[0;
0;
0];
db92td=[0;
0;
0];
db102td=[(cos(b27)*sin(b28)*db27+sin(b27)*cos(b28)*db28);
(- cos(b27)*cos(b28)*db27+sin(b27)*sin(b28)*db28);
-sin(b27)*db27];
% Corpo 7 (roda + pneu) da13td=[0;
-jbmtd*sin(b21)*db21;
-jbmtd*cos(b21)*db21];
da23td=[0;
0;
0];
da33td=[0;
0;
0];
da43td=[0;
0;
0];
da53td=[0;
0;
0];
da63td=[0;
```

0;

0];

da73tdx=db27*(-hbmt*d*cos(b27)*sin(b28)- hgmtd*sin(b28)*
cos(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+hgmtd*sin(b28)*cos(b27)*
cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td)-hgmtd*sin(b28)*sin(b27)*
sin(ro2td));

da73tdx=da73tdx+db28*(hbmt*d*cos(b27)*cos(b28)- hgmtd*cos(b28)*
sin(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+hgmtd*cos(b28)*sin(b27)*
cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td)+hgmtd*cos(b28)*cos(b27)*sin(ro2td));

da73tdx=da73tdx+db30*(-hgmtd*sin(b28)*sin(b27)*cos(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)-
hgmtd*sin(b28)*sin(b27)*sin(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td));

da73tdy=db27*(hbmt*d*sin(b27)*cos(b28)+hgmtd*cos(b28)*cos(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*
cos(ro2td)- hgmtd*cos(b28)*cos(b27)*cos(b30)*cos(ro1td)*
cos(ro2td)+hgmtd*cos(b28)*sin(b27)*sin(ro2td));

da73tdy=da73tdy+db28*(hbmt*d*cos(b27)*sin(b28)-
hgmtd*sin(b28)*sin(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+hgmtd*sin(b28)*sin(b27)*
cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td)+hgmtd*sin(b28)*cos(b27)*
sin(ro2td));

da73tdy=da73tdy+db30*(hgmtd*cos(b28)*sin(b27)*cos(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+hgmtd*
cos(b28)*sin(b27)*sin(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td));

da73tdz=db27*(-hbmt*d*cos(b27)+hgmtd*sin(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)-
hgmtd*sin(b27)*cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td)-hgmtd*
cos(b27)*sin(ro2td));

da73tdz=da73tdz+db30*(-hgmtd*cos(b27)*cos(b30)*sin(ro1td)*
cos(ro2td)- hgmtd*cos(b27)*sin(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td));

da73td=[da73tdx;

da73tdy;

da73tdz];

da83tdx=db27*(hbmt*d*cos(b27)*cos(b28)+hgmtd*(-cos(b28)*sin(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)
sin(b27)*cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td)+cos(b28)*
cos(b27)*sin(ro2td));

da83tdx=da83tdx+db28*(-hbmt*d*sin(b27)*sin(b28)+hgmtd*((cos(b28)*cos(b30)-
sin(b28)*cos(b27)*sin(b30))*sin(ro1td)*cos(ro2td)+(cos(b28)*sin(b30)+sin(b28)*
cos(b27)*cos(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td)-sin(b28)*sin(b27)*sin(ro2td));

da83tdx=da83tdx+db30*(hgmtd*((-sin(b28)*sin(b30)+cos(b28)*cos(b27)*cos(b30))*
sin(ro1td)*cos(ro2td)+(sin(b28)*cos(b30)+cos(b28)*
cos(b27)*sin(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td));

da83tdy=db27*(hbmt*d*cos(b27)*sin(b28)+hgmtd*(-sin(b28)*sin(b27)*
sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+sin(b28)*sin(b27)*cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td)+sin(b28)*

```

cos(b27)*sin(ro2td));
da83tdy=da83tdy+db28*(hbmt*d*sin(b27)*cos(b28)+hgmt*d*((sin(b28)*cos(b30)+cos(b28)*
c os(b27)*sin(b30))*sin(ro1td)*cos(ro2td)+(sin(b28)*
sin(b30)-cos(b28)*cos(b27)*cos(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td)+cos(b28)*sin(b27)*sin(ro2td));
da83tdy=da83tdy+db30*(hgmt*d*((cos(b28)*sin(b30)+sin(b28)*cos(b27)*cos(b30))*
sin(ro1td)*cos(ro2td)+(-cos(b28)*cos(b30)+sin(b28)*
cos(b27)*sin(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td));
da83td=[da83tdx;
da83tdy;
0];
da93td=[0;
0;
0];
da103tdx=db27*(hgmt*d*(-sin(b28)*sin(b27)*cos(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)-
sin(b28)*sin(b27)*sin(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td));
da103tdx=da103tdx+db28*(hgmt*d*((-sin(b28)*sin(b30)+cos(b28)*cos(b27)*cos(b30))*
sin(ro1td)*cos(ro2td)+(sin(b28)*cos(b30)+cos(b28)*cos(b27)*sin(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td));
da103tdx=da103tdx+db30*(hgmt*d*((cos(b28)*cos(b30)-sin(b28)*
cos(b27)*sin(b30))*sin(ro1td)*cos(ro2td)+(cos(b28)*sin(b30)+sin(b28)*
cos(b27)*c os(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td));
da103tdy=db27*(hgmt*d*(cos(b28)*sin(b27)*cos(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+cos(b28)*
sin(b27)*sin(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td));
da103tdy=da103tdy+db28*(hgmt*d*((cos(b28)*sin(b30)+
sin(b28)*cos(b27)*cos(b30))*sin(ro1td)*cos(ro2td)+
(-cos(b28)*cos(b30)+sin(b28)*cos(b27)*sin(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td));
da103tdy=da103tdy+db30*(hgmt*d*((sin(b28)*cos(b30)+cos(b28)*cos(b27)*sin(b30))*
sin(ro1td)*cos(ro2td)+(sin(b28)*sin(b30)-cos(b28)*
cos(b27)*cos(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td));
da103tdz=db27*(hgmt*d*(-cos(b27)*cos(b30)*sin(ro1td)*
cos(ro2td)-cos(b27)*sin(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td));
da103tdz=da103tdz+db30*(hgmt*d*(sin(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)-
sin(b27)*cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td));
da103td=[da103tdx;
da103tdy;
da103tdz];
db23td=[0;
0;
0];
db23td=[0;

```

```

0;
0];
db33td=[0;
0;
0];
db43td=[0;
0;
0];
db53tdx=db27*(sin(b28)*sin(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)- sin(b28)*sin(b27)*
cos(b30)*cos(ro1td)*
cos(ro2td)-sin(b28)*cos(b27)*sin(ro2td));
db53tdx=db53tdx+db28*((-sin(b28)*cos(b30)- cos(b28)*cos(b27)*sin(b30))*sin(ro1td)*
cos(ro2td)-(sin(b28)*sin(b30)- cos(b28)*cos(b27)*
cos(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td)-cos(b28)*sin(b27)*sin(ro2td));
db53tdx=db53tdx+db30*((-cos(b28)*sin(b30)- sin(b28)*cos(b27)*cos(b30))*sin(ro1td)*cos(ro2td)-
(- cos(b28)*
cos(b30)+sin(b28)*cos(b27)*sin(b30))*
cos(ro1td)*cos(ro2td));
db53tdy=db27*(- cos(b28)*sin(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+
cos(b28)*sin(b27)*cos(b30)*cos(ro1td)*c os(ro2td)+cos(b28)*cos(b27)*sin(ro2td));
db53tdy=db53tdy+db28*((cos(b28)*cos(b30)- sin(b28)*cos(b27)*
sin(b30))*sin(ro1td)*cos(ro2td)-(-cos(b28)*sin(b30)- sin(b28)*cos(b27)*
cos(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td)-sin(b28)*sin(b27)*sin(ro2td));
db53tdy=db53tdy+db30*((- sin(b28)*sin(b30)+cos(b28)*cos(b27)*cos(b30))*
sin(ro1td)*cos(ro2td)-(-sin(b28)*cos(b30)- cos(b28)*
cos(b27)*sin(b30))*cos(ro1td)*cos(ro2td));
db53tdz=db27*(cos(b27)*sin(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)- cos(b27)*
cos(b30)*cos(ro1td)*cos(ro2td)+sin(b27)*sin(ro2td));
db53tdz=db53tdz+db30*(sin(b27)*cos(b30)*sin(ro1td)*cos(ro2td)+sin(b27)*sin(b30)*
cos(ro 1td)*cos(ro2td));
db53td=[db53tdx;
db53tdy;
db53tdz];
db63td=[0;
0;
0];
db73td=[-sin(b28)*db28;
cos(b28)*db28;
0];

```



```

db83td=[0;
0;
0];
db93td=[0;
0;
0];
db103td=[(cos(b27)*sin(b28)*db27+sin(b27)*cos(b28)*db28);
(-cos(b27)*cos(b28)*db27+sin(b27)*sin(b28)*db28);
-sin(b27)*db27];
% derivada da Jacobina absoluta (DJatd)
DJatd=[da12td da22td da32td da42td da52td da62td da72td da82td da92td da102td
db22td db22td db32td db42td db52td db62td db72td db82td db92td db102td
da13td da23td da33td da43td da53td da63td da73td da83td da93td da103td
db23td db23td db33td db43td db53td db63td db73td db83td db93td db103td];
% determinação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) e sua derivada (Jgstd e
DJgstd)
Jgstd=Jatd*Jrtd;
DJgstd=DJatd*Jrtd+Jatd*DJrtd;
% Transformação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) para o referencial (XYZ)c
Jgctd=Rootd*Jgstd;
%(12x2) Jgtd=[zeros(12,4) Jgctd
zeros(12,6)];
DJgctd=Rootd*DJgstd;
DJgtd=[zeros(12,4) DJgctd
zeros(12,6)];
%Submatrizes da matriz MKR
L3td=Ac*r3tdc;
L3tdtil=[0 -L3td(3) L3td(2);
L3td(3) 0 -L3td(1);
-L3td(2) L3td(1) 0];
% matriz antissimétrica td L3
K3td=[eye(3) -L3tdtil;
zeros(3) eye(3)];
R3td=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
L7td=Ac*r7tdc;
L7tdtil=[0 -L7td(3) L7td(2);
L7td(3) 0 -L7td(1);
-L7td(2) L7td(1) 0];

```

```

% matriz antissimétrica td L7
K7td=[eye(3) -L7tdtil;
zeros(3) eye(3)];
R7td=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
%Derivadas das submatrizes da matriz DMKR
DL3td=Ac*dr3tdc+DAc*r3tdc;
DL3tdtil=[0 -DL3td(3) DL3td(2);
DL3td(3) 0 -DL3td(1);
-DL3td(2) DL3td(1) 0];
% matriz antissimétrica td DL3
DK3td=[zeros(3) -DL3tdtil;
zeros(3) zeros(3)];
DR3td=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
DL7td=Ac*dr7tdc+DAc*r7tdc;
DL7tdtil=[0 -DL7td(3) DL7td(2);
DL7td(3) 0 -DL7td(1);
-DL7td(2) DL7td(1) 0];
% matriz antissimétrica td DL7
DK7td=[zeros(3) -DL7tdtil;
zeros(3) zeros(3)];
DR7td=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
% determinação do tensor de inércia de todos os corpos no referencial inercial
T3tdi=(Ac*Rotd*A3tdfgh)*T3tdcm*((A3tdfgh.)*(Rotd.)*(Ac.));
T7tdi=(Ac*Rotd*A3tdfgh*A1td*A2td)*T7tdcm*((A2td.)*(A1td.)*(A3tdfgh.)*(Rotd.)*(Ac.));
Ttdi=[m3td*eye(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) T3tdi zeros(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) m7td*eye(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3) T7tdi];
% determinação dos vetores de velocidades angulares dos corpos em relação ao referencial
inercial
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
W3tditil=(Ac*DA3tdc+DAc*A3tdc)*((Ac*A3tdc.));
W3tdix=W3tditil(3,2);
W3tdiy=W3tditil(1,3);
W3tdiz=W3tditil(2,1);
W3tdi=[W3tdix;

```

```

W3tdiy;
W3tdiz];
% Corpo 7 (roda + pneu)
W7tditil=(Ac*DA7tdc+DAc*A7tdc)*((Ac*A7tdc).');
W7tdix=W7tditil(3,2);
W7tdiy=W7tditil(1,3);
W7tdiz=W7tditil(2,1);
W7tdi=[W7tdix;
W7tdiy;
W7tdiz];
% determinação do vetor de forças giroscópicas (bstd)
bs3td=[zeros(3,1);
W3tditil*T3tdi*W3tdi];
bs7td=[zeros(3,1);
W7tditil*T7tdi*W7tdi];
bstd=[bs3td;
bs7td];
% determinação da força da mola (Fmtd)
if(escolhasusp == 1)
cinsttd=ccomptd-b22;
dmttd=clivretd-cinsttd;
fmdtd=kmttd*dmttd;
end
if(escolhasusp == 2)
dmttd=b22;
fmdtd=2.416*10^4*exp(0.008371*dmttd*1000)+67.33*exp(0.05772*dmttd*1000);
end
if(escolhasusp == 3)
dmttd=b22;
fmdtd=11.1196*(2.416*10^4*exp(0.008371*dmttd*1000)+67.33*exp(0.05772*dmttd*1000));
end
% determinação da força do amortecedor (Fbtd)
fatd=batd*db22;
% determinação da força vertical provocada pela deflexão do pneu (Fptd)
r7tdi=rci+Ac*r7tdc;
rrtdfgh4=[0;
0;
-rroda];
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial (fgh)4

```

```

rrtdc=r7tdc+Rotd*A3tdfgh*A1td*rrtdfgh4;
rrtdi=rci+Ac*rrtdc;
rptdfgh4=[0;
0;
-rroda-hp];
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial (fgh)4
rptdi=r7tdi+Ac*Rotd*A3tdfgh*A1td*rptdfgh4;
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial inercial
if (rptdi(3)<=0)
rptdi(3)=0;
cinstptd=rrtdi(3)-rptdi(3);
% deformação do pneu
fbatptd=0;
if (rrtdi(3)<=0.005)
fbatptd=kbatp*(0.005-rrtdi(3));
end
fvptd=kp*(hp-cinstptd)+ fbatptd;
end
if (rptdi(3)>0) % perda de contato com o solo
cinstptd=rrtdi(3)-rptdi(3);
fvptd=0;
end
% Determinação do ângulo de câmbor dtd=r7tdc-rrtdc;
auxdtd=sqrt(dtd(2)^2+dtd(3)^2);
udtd=[0;
(dtd(2)/auxdtd);
(dtd(3)/auxdtd)];
gamatd=acos(udtd(3));
fvptd=fvptd/(cos(gamatd));
% correção da força vertical devido ao ângulo de câmbor
% SUSPENSÃO INTERMEDIARIA ESQUERDA
% Determinação dos valores das coordenadas de junta
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
b31=q31;
% ângulo entre a bandeja e o chassis
aux31=jcmte^2+jbmte^2+2*jbmte*
(jcgte*sin(b31)-jchte*cos(b31));
b32=pte-sqrt(aux31);
% deslocamento da mola ou amortecedor a partir da configuração de curso máximo do

```

```

amortecedor
b33=acos((jchte-jbmte*cos(b31))/(pte-b32));
% 2o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo + cubo da roda)
b34=atan2(jcfte,(-jbmte*sin(b31)-jcgte));
% 1o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo + cubo da roda)
b35=q32;
% 2o TRANSFORMADOR (DIREÇÃO)
b36=b32;
b37=b33;
b38=b34;
qvolte=coefest*qvol;
b39=0.311078830-const_est*qvol*coefest;
% deslocamento linear da cremalheira
% b39=0.3178-const_est*qvol*coefest;
% deslocamento linear da cremalheira
% determinação de b40 - 3o ângulo de Euler do corpo 3
a1te=2*fdmte*((clfte+f2te*b39)*cos(b38)+
(clgte+g2te*b39)*sin(b38));
a2te=-2*fdmte*((clfte+f2te*b39)*sin(b38)*cos(b37)-(clgte+g2te*b39)*cos(b38)*
cos(b37)-(clhte+h2te*b39)*sin(b37));
a3te=-clmte^2-
(pte-b36-fbmte)^2-fdmte^2+
demte^2-(f2te^2+
g2te^2+h2te^2)*b39^2-
2*(clfte*f2te+clgte*g2te+clhte*h2te)*b39-2*(pte-b36-fbmte)*
((clfte+f2te*b39)*sin(b38)*sin(b37)-(clgte+g2te*b39)*cos(b38)*sin(b37)+(clhte+h2te*b39)*
cos(b37));
a4te=a1te^2+a2te^2
-a3te^2;
%discriminante da eq. do 2ograu que determina b40
if (a4te>=0)
x1te=(a1te*a3te+a2te*sqrt(a4te))/(a1te^2+a2te^2);
y1te=(a2te*a3te-a1te*sqrt(a4te))/(a1te^2+a2te^2);
x2te=(a1te*a3te-a2te*sqrt(a4te))/(a1te^2+a2te^2);
y2te=(a2te*a3te+a1te*sqrt(a4te))/(a1te^2+a2te^2);
b40a=(pi/2)*(sign(y1te)-1)+acos(sign(y1te)*x1te);
b40b=(pi/2)*(sign(y2te)-1)+acos(sign(y2te)*x2te);
end
b40=b40b;

```

```

% determinação das matrizes seleção de entradas modificadas (V31m e V32m) e das
matrizes jacobianas das restrições Jb31 e Jb32 (informação da geometria da suspensão e
da direção)
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
V31m=[1 0
0 0
0 0
0 0
0 1];
jb3121=2*jbmte*(jcgte*cos(b31)+jchte*sin(b31));
jb3122=2*(-b32+pte);
jb3131=-jbmte*sin(b31)/(pte-b32);
jb3132=-(jchte-jbmte*cos(b31))/(pte-b32)^2;
jb3133=-sin(b33);
jb3141=-jcfte*jbmte*cos(b31)/(-jbmte*sin(b31)-jcgte)^2;
jb3144=1+(tan(b34))^2;
Jb31=[1 0 0 0 0 % matriz jacobiana beta de restrições
jb3121 jb3122 0 0 0
jb3131 jb3132 jb3133 0 0
jb3141 0 0 jb3144 0
0 0 0 0 1];
% 2o TRANSFORMADOR (DIREÇÃO)
V32m=[0 0 % matriz seleção de entradas modificada
0 0
0 0
0 0
0 0];
jb3251=-2*pte+2*b36+2*fbmte- 2*(clfte+f2te*b39)*
sin(b38)*sin(b37)+2*(clgte+g2te*b39)*cos(b38)*sin(b37)-
2*(clhte+h2te*b39)*cos(b37);
jb3252=-2*fdmte*
(- (clfte+f2te*b39)*sin(b38)*sin(b37)+(clgte+g2te*b39)*
cos(b38)*sin(b37)- (clhte+h2te*b39)*
cos(b37))*sin(b40)+(2*pte-2*b36- 2*fbmte)*((clfte+
f2te*b39)*sin(b38)*cos(b37)-(clgte+g2te*b39)*cos(b38)*cos(b37)- (clhte+h2te*b39)*
sin(b37));
jb3253=2*fdmte*(-(clfte+f2te*b39)*sin(b38)+(clgte+g2te*
b39)*cos(b38))*cos(b40)- 2*fdmte*
((clfte+f2te*b39)*cos(b38)*cos(b37)+(clgte+g2te*b39)*sin(b38)*cos(b37))*

```

```

sin(b40) +2*(pte-b36- fbmte)*((clfte+
f2te*b39)*cos(b38)*sin(b37)+(clgte+g2te*b39)*sin(b38)*sin(b37));
jb3254=2*fdmte*(f2te*cos(b38)+g2te*sin(b38))*cos(b40)-
2*fdmte*(f2te*sin(b38)*cos(b37)-g2te*cos(b38)*cos(b37)-
h2te*sin(b37))*sin(b40)+2*(f2te^2+
g2te^2+h2te^2)*b39+2*
clfte*f2te+2*clgte*g2te+2*clhte* h2te+(2*pte-2*b36-2*fbmte)*
(f2te*sin(b38)*sin(b37)- g2te*cos(b38)*sin(b37)+
h2te*cos(b37));
jb3255=-a1te*sin(b40)+a2te*cos(b40);
Jb32=[1 0 0 0 0 % matriz jacobiana beta de restrições
0 1 0 0 0
0 0 1 0 0
0 0 0 1 0
jb3251 jb3252 jb3253 jb3254 jb3255];
% ACOPLAMENTO DOS TRANSFORMADORES
V3m=[V31m;
V32m];
% matriz seleção de entradas modificada
C321=[0 -1 0 0 0 % matriz de acoplamento dos transformadores
0 0 -1 0 0
0 0 0 -1 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0];
Jbte=[Jb31 zeros(5);
C321 Jb32];% matriz jacobiana beta de restrições
% determinação da matriz jacobiana relativa do mecanismo (Jr)
Jrte=(inv(Jbte))*V3m;
% determinação do vetor de velocidades das coordenadas de junta (db1)
db3=Jrte*[dq31;
dq32];
db31=db3(1);
db32=db3(2);
db33=db3(3);
db34=db3(4);
db35=db3(5);
db36=db3(6);
db37=db3(7);
db38=db3(8);

```

```

db39=db3(9);
db40=db3(10);
% determinação da derivada da matriz jacobiana beta do mecanismo(DJbte)
djb3121=2*jbmte*(-jcgte*sin(b31)+jchte*cos(b31))*db31;
djb3122=-2*db32;
djb3131=-jbmte*(cos(b31)*(pte-b32)*db31+sin(b31)*db32)/(pte-b32)^2;
djb3132=-db31*jbmte*sin(b31)/(pte-b32)^2+2*db32*(-jchte+jbmte*
cos(b31))/(pte-b32)^3;
djb3133=-(cos(b33))*
db33;
djb3141=db31*(jcfte*jbmte*sin(b31)/(-jbmte*sin(b31)-
jcgte)^2- 2*jcfte*jbmte^2*
cos(b31)^2/(-jbmte*sin(b31)-jcgte)^3);
djb3144=2*tan(b34)*(1+(tan(b34))^2)*
db34;
djb3251=2*db36;
djb3251=djb3251+(-
(2*clfte+2*f2te*b39)*sin(b38)*cos(b37)+(2*clgte+2*g2te*b39)*cos(b38)*cos(b37)+(2*clhte+
2*h2te*b39)*sin(b37))*db37;
djb3251=djb3251+(-(2*clfte+2*f2te*b39)*cos(b38)*sin(b37)-
(2*clgte+2*g2te*b39)*sin(b38)*sin(b37))*db38;
djb3251=djb3251+(-2*f2te*sin(b38)*sin(b37)+2*g2te*
cos(b38)*sin(b37)- 2*h2te*cos(b37))*db39;
djb3252=(- 2*(clfte+f2te*b39)*sin(b38)*cos(b37)+2*(clgte+g2te*
b39)*cos(b38)*cos(b37)+2*(clhte+h2te *b39)*sin(b37))*db36;
djb3252=djb3252+(-2*fdmte*((-clfte- f2te*b39)*sin(b38)*
cos(b37)+(clgte+g2te*b39)*cos(b38)*
cos(b37)+(clhte+h2te*b39)*
sin(b3 7))*sin(b40)+(2*pte-2*b36-2*fbmte)*(-
(clfte+f2te*b39)*sin(b38)*sin(b37)+(clgte+g2te*b39)*cos(b38)*sin(b37)- (clhte+h2te*b39)*
cos(b37)))*db37;
djb3252=djb3252+(-2*fdmte*((-clfte-f2te*b39)*cos(b38)*sin(b37)- (clgte+g2te*b39)*sin(b38)*sin(b37)
2*
b36- 2*fbmte)*((clfte+f2te*b39)*cos(b38)*cos(b37)+(clgte+
g2te*b39)*sin(b38)*cos(b37)))*db38;
djb3252=djb3252+(-2*
fdmte*(-f2te*sin(b38)*sin(b37)+g2te*cos(b38)*sin(b37)-
h2te*cos(b37))*sin(b40)+(2*pte-2*b36-2*fbmte)*(f2te*sin(b38)*cos(b37)- g2te*cos(b38)*
cos(b37)-h2te*sin(b37)))*db39;

```


$$\begin{aligned}
 & \text{djb3252} = \text{djb3252} + (-2 * \text{fdmte} * ((-\text{clfte} - \text{f2te} * \text{b39}) * \sin(\text{b38}) * \\
 & \sin(\text{b37}) + (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) - (\text{clhte} + \text{h2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b37})) * \\
 & \cos(\text{b40})) * \text{db40}; \\
 & \text{djb3253} = (-2 * (\text{clfte} + \text{f2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) - 2 * (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \\
 & \sin(\text{b38}) * \sin(\text{b37})) * \text{db36}; \\
 & \text{djb3253} = \text{djb3253} + (-2 * \text{fdmte} * (- (\text{clfte} + \text{f2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) - (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \\
 & \sin(\text{b38}) * \sin(\text{b37})) * \sin(\text{b40}) + (2 * \text{pte} - 2 * \text{b36} - 2 * \text{fbmte}) * ((\text{clfte} + \\
 & \text{f2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) * \cos(\text{b37}) + (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \sin(\text{b38}) * \cos(\text{b37}))) * \text{db37}; \\
 & \text{djb3253} = \text{djb3253} + (2 * \text{fdmte} * ((-\text{clfte} - \text{f2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) - (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \\
 & \sin(\text{b38})) * \cos(\text{b40}) - 2 * \text{fdmte} * (- (\text{clfte} + \text{f2te} * \text{b39}) * \sin(\text{b38}) * \\
 & \cos(\text{b37}) + (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) * \cos(\text{b37})) * \sin(\text{b40}) + (2 * \text{pte} - 2 * \text{b36} - 2 * \text{fbmte}) * (- \\
 & (\text{clfte} + \text{f2te} * \text{b39}) * \sin(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) + (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) * \sin(\text{b37}))) * \text{db38}; \\
 & \text{djb3253} = \text{djb3253} + (2 * \text{fdmte} * (-\text{f2te} * \sin(\text{b38}) + \text{g2te} * \cos(\text{b38})) * \cos(\text{b40}) - 2 * \text{fdmte} * (\text{f2te} * \cos(\text{b38}) * \\
 & \cos(\text{b37}) + \text{g2te} * \sin(\text{b38}) * \cos(\text{b37})) * \sin(\text{b40}) + (2 * \text{pte} - 2 * \text{b36} - 2 * \text{fbmte}) * (\text{f2te} * \cos(\text{b38}) * \\
 & \sin(\text{b37}) + \text{g2te} * \sin(\text{b38}) * \sin(\text{b37}))) * \text{db39}; \\
 & \text{djb3253} = \text{djb3253} + (-2 * \text{fdmte} * ((-\text{clfte} - \text{f2te} * \text{b39}) * \sin(\text{b38}) + \\
 & (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38})) * \sin(\text{b40}) - 2 * \text{fdmte} * ((\text{clfte} + \text{f2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) * \cos(\text{b37}) + (\text{clgte} + \text{g2te} * \\
 & \text{b39}) * \sin(\text{b38}) * \cos(\text{b37})) * \cos(\text{b40})) * \text{db40}; \\
 & \text{djb3254} = (-2 * \text{f2te} * \sin(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) + 2 * \text{g2te} * \cos(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) - \\
 & 2 * \text{h2te} * \cos(\text{b37})) * \text{db36}; \\
 & \text{djb3254} = \text{djb3254} + (-2 * \text{fdmte} * (-\text{f2te} * \sin(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) + \text{g2te} * \\
 & \cos(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) - \text{h2te} * \cos(\text{b37})) * \sin(\text{b40}) + (2 * \text{pte} - 2 * \text{b36} - 2 * \text{fbmte}) * (\text{f2te} * \sin(\text{b38}) * \\
 & \cos(\text{b37}) - \text{g2te} * \cos(\text{b38}) * \cos(\text{b37}) - \text{h2te} * \sin(\text{b37}))) * \text{db37}; \\
 & \text{djb3254} = \text{djb3254} + (2 * \text{fdmte} * (-\text{f2te} * \sin(\text{b38}) + \text{g2te} * \cos(\text{b38})) * \cos(\text{b40}) - \\
 & 2 * \text{fdmte} * (\text{f2te} * \cos(\text{b38}) * \cos(\text{b37}) + \text{g2te} * \sin(\text{b38}) * \cos(\text{b37})) * \sin(\text{b40}) + (2 * \text{pte} - 2 * \text{b36} - \\
 & 2 * \text{fbmte}) * (\text{f2te} * \cos(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) + \text{g2te} * \sin(\text{b38}) * \sin(\text{b37}))) * \text{db38}; \\
 & \text{djb3254} = \text{djb3254} + (2 * \text{f2te}^2 + 2 * \text{g2te}^2 + 2 * \text{h2te}^2) * \text{db39}; \\
 & \text{djb3254} = \text{djb3254} + (-2 * \text{fdmte} * (\text{f2te} * \cos(\text{b38}) + \text{g2te} * \sin(\text{b38})) * \sin(\text{b40}) - 2 * \text{fdmte} * (\text{f2te} * \\
 & \sin(\text{b38}) * \cos(\text{b37}) - \text{g2te} * \cos(\text{b38}) * \cos(\text{b37}) - \text{h2te} * \sin(\text{b37})) * \cos(\text{b40})) * \text{db40}; \\
 & \text{djb3255} = (-2 * \text{fdmte} * (- (\text{clfte} + \text{f2te} * \text{b39}) * \sin(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) + (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \\
 & \cos(\text{b38}) * \sin(\text{b37}) - (\text{clhte} + \text{h2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b37})) * \cos(\text{b40})) * \text{db37}; \\
 & \text{djb3255} = \text{djb3255} + (-2 * \text{fdmte} * (- (\text{clfte} + \text{f2te} * \text{b39}) * \sin(\text{b38}) + (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38})) * \\
 & \sin(\text{b40}) - 2 * \text{fdmte} * ((\text{clfte} + \text{f2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) * \cos(\text{b37}) + (\text{clgte} + \text{g2te} * \\
 & \text{b39}) * \sin(\text{b38}) * \cos(\text{b37})) * \cos(\text{b40})) * \text{db38}; \\
 & \text{djb3255} = \text{djb3255} + (-2 * \text{fdmte} * (\text{f2te} * \cos(\text{b38}) + \text{g2te} * \sin(\text{b38})) * \sin(\text{b40}) - 2 * \text{fdmte} * (\text{f2te} * \sin(\text{b38}) * \\
 & \cos(\text{b37}) - \text{g2te} * \cos(\text{b38}) * \cos(\text{b37}) - \text{h2te} * \sin(\text{b37})) * \cos(\text{b40})) * \text{db39}; \\
 & \text{djb3255} = \text{djb3255} + (- 2 * \text{fdmte} * ((\text{clfte} + \\
 & \text{f2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38}) + (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \sin(\text{b38})) * \cos(\text{b40}) + 2 * \text{fdmte} * ((\text{clfte} + \\
 & \text{f2te} * \text{b39}) * \sin(\text{b38}) * \cos(\text{b37}) - (\text{clgte} + \text{g2te} * \text{b39}) * \cos(\text{b38})) *
 \end{aligned}$$

```

cos(b37)-(clhte+h2te*b39)*sin(b37))*sin(b40))*db40;
DJb31=[0 0 0 0 0 % derivada da matriz jacobiana beta de restrições do 1otransformador
djb3121 djb3122 0 0 0
djb3131 djb3132 djb3133 0 0
djb3141 0 0 djb3144 0
0 0 0 0 0];
DJb32=[0 0 0 0 0 % derivada da matriz jacobiana beta de restrições do 2otransformador
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
djb3251 djb3252 djb3253 djb3254 djb3255];
DJbte=[DJb31 zeros(5);
zeros(5) DJb32];
% derivada da matriz jacobiana beta de restrições
% determinação da derivada da matriz jacobiana relativa(DJrte)
djr321=(-djb3121*jb3122+jb3121*djb3122)/(jb3122)^2;
djr331=(-djb3131*jb3133+jb3131*djb3133)/jb3133^2;
djr331=djr331+(jb3122*jb3133*(jb3132*djb3121+djb3132*jb3121)- jb3121*
jb3132*(djb3133*jb3122+jb3133*djb3122))/(jb3133*jb3122)^2;
djr341=(-djb3141*jb3144+jb3141*djb3144)/jb3144^2;
djr361=djr321;
djr371=djr331;
djr381=djr341;
djr3101=(jb3144*jb3255*(djb3141*jb3253+jb3141*djb3253)- jb3141*jb3253*
(djb3144*jb3255+jb3144*djb3255))/(jb3144*jb3255)^2;
djr3101=djr3101+(jb3133*jb3255*(djb3131*jb3252+jb3131*djb3252)- jb3131*jb3252*
(djb3133*jb3255+jb3133*djb3255))/(jb3133*jb3255)^2;
djr3101=djr3101+(jb3122*jb3255*(djb3121*jb3251+jb3121*djb3251)- jb3121*jb3251*
(djb3122*jb3255+jb3122*djb3255))/(jb3122*jb3255)^2;
djr3101=djr3101- (jb3122*jb3133*jb3255*(djb3121*jb3132*jb3252+jb3121*
djb3132*jb3252+jb3121*jb3132*d jb3252)- jb3121*jb3132*
jb3252*(djb3122*jb3133*jb3255+jb3122*djb3133*jb3255+jb3122*
jb3133*dj b3255))/(jb3122*jb3133*jb3255)^2;
% derivada da matriz jacobiana relativa
DJrte=[0 0
djr321 0
djr331 0
djr341 0
0 0

```

```

djr361 0
djr371 0
djr381 0
0 0
djr3101 0];
% CINEMÁTICA ABSOLUTA
% Posição e velocidade linear dos C.M. dos corpos em relação ao referencial do chassis
% Corpo 2 (bandeja)
A2tefgh=[1 0 0 % matriz transformação do corpo 2 para o referencial (fgh)
0 sin(b31) cos(b31)
0 -cos(b31) sin(b31)];
A2tec=Rote*A2tefgh;% matriz transformação do corpo 2 para o referencial (XYZ)c
DA2tefgh=db31*[0 0 0;
0 cos(b31) -sin(b31);
0 sin(b31) cos(b31)];
% derivada da matriz transformação do corpo 2 para o referencial (fgh)
DA2tec=Rote*DA2tefgh;% derivada da matriz transformação do corpo 2 para o referencial
(XYZ)c
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
A3tefgh=[(cos(b38)*cos(b40)-sin(b38)*cos(b37)*sin(b40)) (-cos(b38)*sin(b40)
- sin(b38)*cos(b37)*cos(b40)) (sin(b38)*sin(b37)) (sin(b38)*cos(b40)+
cos(b38)*cos(b37)*sin(b40)) (- sin(b38)*sin(b40)+
cos(b38)*cos(b37)*cos(b40)) (-cos(b38)*sin(b37)) (sin(b37)*sin(b40)) (sin(b37)*cos(b40))
(cos(b37))];
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh)
A3tec=Rote*A3tefgh;% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (XYZ)c
r3te=[0;
0;
hbmtel;% posição do C.M. em relação à junta esférica (ponto B)
r3tec=rrte+A2tec*[0;
-jbmtel;
0]+A3tec*r3te;
% posição do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% derivada da matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh)
DA3tefgh=db37*[sin(b38)*sin(b37)*sin(b40) sin(b38)*sin(b37)*cos(b40) sin(b38)*
cos(b37) -cos(b38)*sin(b37)*sin(b40) -cos(b38)*
sin(b37)*cos(b40) -cos(b38)*cos(b37) cos(b37)*
sin(b40) cos(b37)*cos(b40) -sin(b37)];
DA3tec=DA3tefgh+db38*[-sin(b38)*cos(b40)-cos(b38)*cos(b37)*sin(b40) sin(b38)*

```

```

sin(b40)-cos(b38)*cos(b37)*cos(b40) cos(b38)*sin(b37) cos(b38)*
cos(b40)-sin(b38)*cos(b37)*sin(b40) -cos(b38)*sin(b40)- sin(b38)*cos(b37)*cos(b40) sin(b38)*
sin(b37) 0 0 0];
DA3tefgh=DA3tefgh+db40*[-cos(b38)*sin(b40)-sin(b38)*cos(b37)*cos(b40) -
cos(b38)*cos(b40)+sin(b38)*cos(b37)*sin(b40) 0 -sin(b38)*
sin(b40)+cos(b38)*cos(b37)*cos(b40) -sin(b38)*cos(b40)- cos(b38)*
cos(b37)*sin(b40) 0 sin(b37)*cos(b40) -sin(b37)*sin(b40) 0];
DA3tec=Rote*DA3tefgh;% derivada da matriz transformação do corpo 3 para o referencial
(XYZ)c
dr3tec=DA2tec*[0;
-jbnte;
0]+DA3tec*r3te;
% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% Corpo 7 (roda + pneu)
A1te=[cos(ro1te)
-sin(ro1te)*cos(ro2te)
sin(ro1te)*sin(ro2te)
sin(ro1te) cos(ro1te)*cos(ro2te) -cos(ro1te)*sin(ro2te)
0 sin(ro2te) cos(ro2te)];% matriz transformação do referencial (fgh)4 para o referencial
(fgh)2
A2te=[cos(b35) -sin(b35) 0;
0 0 1;
-sin(b35) -cos(b35) 0];
% matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4 A7tefgh=A3tefgh*A1te*A2te;
% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (fgh)
A7tec=Rote*A7tefgh;
% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
r7te=[0;
0;
hgnte];
% posição do C.M. em relação ao referencial (fgh)4 (ponto H)
r7tec=rrte+A2tec*[0;
-jbnte;
0]+A3tec*r3te+A7tec*r7te;
% posição do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
DA2te=db35*[-sin(b35) -cos(b35) 0;
0 0 0;
-cos(b35) sin(b35) 0];
% derivada da matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4

```

```

DA7tefgh=DA3tefgh*A1te*A2te+A3tefgh*A1te*DA2te;
DA7tec=Rote*DA7tefgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
dr7tec=DA2tec*[0;
-jbmte;
0]+DA3tec*r3te+DA7tec*r7te;
% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% Jacobiana absoluta(Jate) em relação ao referencial da suspensão (fgh)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
a12te=[0;
-jbmte*cos(b31);
-jbmte*sin(b31)];
a22te=[0;
0;
0];
a32te=[0;
0;
0];
a42te=[0;
0;
0];
a52te=[0;
0;
0];
a62te=[0;
0;
0];
a72te=[hbmte*cos(b37)*sin(b38);
-hbmte*cos(b37)*cos(b38);
-hbmte*sin(b37)];
a82te=[hbmte*sin(b37)*cos(b38);
hbmte*sin(b37)*sin(b38);
0];
a92te=[0;
0;
0];
a102te=[0;
0;
0];

```

```
b32te=[0;
0;
0];
b22te=[0;
0;
0];
b32te=[0;
0;
0];
b42te=[0;
0;
0];
b52te=[0;
0;
0];
b62te=[0;
0;
0];
b72te=[cos(b38);
sin(b38);
0];
b82te=[0;
0;
1];
b92te=[0;
0;
0];
b102te=[sin(b37)*sin(b38);
-sin(b37)*cos(b38);
cos(b37)];
% Corpo 7 (roda + pneu) a13te=[0;
-jbmte*cos(b31);
-jbmte*sin(b31)];
a23te=[0;
0;
0];
a33te=[0;
0;
0];
```

```

a43te=[0;
0;
0];
a53te=[0;
0;
0];
a63te=[0;
0;
0];
a73te=[hbmte*cos(b37)*sin(b38)+(- sin(b38)*sin(b37)*sin(b40)*
sin(ro1te)*cos(ro2te)+sin(b38)*sin(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*
cos(ro2te)+sin(b38)*cos(b37)*sin(ro2te))*hgmte -hbmte*cos(b37)*
cos(b38)+(cos(b38)*sin(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)- cos(b38)*sin(b37)*
cos(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te)-cos(b38)*cos(b37)*sin(ro2te))*hgmte -hbmte*sin(b37)+
(- cos(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)+cos(b37)*
cos(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te)- sin(b37)*sin(ro2te))*hgmte];
a83te=[hbmte*sin(b37)*cos(b38)+(-(-sin(b38)*cos(b40)- cos(b38)*cos(b37)*
sin(b40))*sin(ro1te)*cos(ro2te)+(sin(b38)*sin(b40)- cos(b38)*cos(b37)*
cos(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te)+cos(b38)*sin(b37)*sin(ro2te))*hgmte hbmte*sin(b37)*
sin(b38)+(-(cos(b38)*cos(b40)- sin(b38)*cos(b37)*sin(b40))*sin(ro1te)*cos(ro2te)+
(-cos(b38)*sin(b40)- sin(b38)*cos(b37)*cos(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te)+
sin(b38)*sin(b37)*sin(ro2te))*hgmte 0];
a93te=[0;
0;
0];
a103te=[(-(-cos(b38)*sin(b40)-sin(b38)*cos(b37)*cos(b40))*sin(ro1te)*cos(ro2te)+
(- cos(b38)*cos(b40)+sin(b38)*cos(b37)*sin(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte (-(-sin(b38)*
sin(b40)+cos(b38)*cos(b37)*cos(b40))*sin(ro1te)*cos(ro2te)+(- sin(b38)*cos(b40)-
cos(b38)*cos(b37)*sin(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte (-sin(b37)*cos(b40)*
sin(ro1te)*cos(ro2te)- sin(b37)*sin(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte];
b33te=[0;
0;
0];
b23te=[0;
0;
0];
b33te=[0;
0;
0];

```

```

b43te=[0;
0;
0];
b53te=[-(cos(b38)*cos(b40)-sin(b38)*cos(b37)*sin(b40))*
sin(ro1te)*cos(ro2te)+(-cos(b38)*sin(b40)-sin(b38)*cos(b37)*
cos(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te)+sin(b38)*sin(b37)*sin(ro2te)-(sin(b38)*cos(b40)+
cos(b38)*cos(b37)*sin(b40))*sin(ro1te)*cos(ro2te)+(-sin(b38)*sin(b40)+
cos(b38)*cos(b37)*cos(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te)-cos(b38)*sin(b37)*
sin(ro2te)-sin(b37)*sin(b40)*
sin(ro1te)*cos(ro2te)+sin(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te)+
cos(b37)*sin(ro2te)];
b63te=[0;
0;
0];
b73te=[cos(b38);
sin(b38);
0];
b83te=[0;
0;
1];
b93te=[0;
0;
0];
b103te=[sin(b37)*sin(b38);
-sin(b37)*cos(b38);
cos(b37)];
% Jacobina absoluta (Jate)
Jate=[a12te a22te a32te a42te a52te a62te a72te a82te a92te a102te
b32te b22te b32te b42te b52te b62te b72te b82te b92te b102te
a13te a23te a33te a43te a53te a63te a73te a83te a93te a103te
b33te b23te b33te b43te b53te b63te b73te b83te b93te b103te];
% derivada da Jacobiana absoluta(DJate)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
da12te=[0;
jbmte*sin(b31)*db31;
-jbmte*cos(b31)*db31];
da22te=[0;
0;
0];

```



```
da32te=[0;
0;
0];
da42te=[0;
0;
0];
da52te=[0;
0;
0];
da62te=[0;
0;
0];
da72te=[hbmte*(- sin(b37)*sin(b38)*db37+cos(b37)*cos(b38)*db38);
hbmte*(sin(b37)*cos(b38)*db37+cos(b37)*sin(b38)*db38);
-hbmte*cos(b37)*db37];
da82te=[hbmte*(cos(b37)*cos(b38)*db37- sin(b37)*
sin(b38)*db38);
hbmte*(cos(b37)*sin(b38)*db37+sin(b37)*cos(b38)*db38);
0];
da92te=[0;
0;
0];
da102te=[0;
0;
0];
db32te=[0;
0;
0];
db22te=[0;
0;
0];
db32te=[0;
0;
0];
db42te=[0;
0;
0];
db52te=[0;
0;
```

```

0];
db62te=[0;
0;
0];
db72te=[-sin(b38)*db38;
cos(b38)*db38;
0];
db82te=[0;
0;
0];
db92te=[0;
0;
0];
db102te=[(cos(b37)*sin(b38)*db37+sin(b37)*cos(b38)*db38);
(- cos(b37)*cos(b38)*db37+sin(b37)*sin(b38)*db38);
-sin(b37)*db37];
% Corpo 7 (roda + pneu) da13te=[0;
jbmte*sin(b31)*db31;
-jbmte*cos(b31)*db31];
da23te=[0;
0;
0];
da33te=[0;
0;
0];
da43te=[0;
0;
0];
da53te=[0;
0;
0];
da63te=[0;
0;
0];
da73tex=db37*(-hbmte*sin(b37)*sin(b38)+(- sin(b38)*cos(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)+
sin(b38)*cos(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te)-sin(b38)*sin(b37)*sin(ro2te))*hgmte);
da73tex=da73tex+db38*(hbmte*cos(b37)*cos(b38)+(- cos(b38)*
sin(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)+
cos(b38)*sin(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te)+cos(b38)*cos(b37)*sin(ro2te))*hgmte);

```

```

da73tex=da73tex+db40*((-sin(b38)*sin(b37)*cos(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)-
sin(b38)*sin(b37)*sin(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da73tey=db37*(hbmte*sin(b37)*cos(b38)+(cos(b38)*cos(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2t
e)-
cos(b38)*cos(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te)+cos(b38)*sin(b37)*sin(ro2te))*hgmte);
da73tez=da73tey+db38*(hbmte*cos(b37)*sin(b38)+(- sin(b38)*
sin(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)+
sin(b38)*sin(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te)+sin(b38)*cos(b37)*sin(ro2te))*hgmte);
da73tey=da73tey+db40*((cos(b38)*sin(b37)*cos(b40)*
sin(ro1te)*cos(ro2te)+cos(b38)*sin(b37)*sin(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da73tez=db37*(-hbmte*cos(b37)+(sin(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)-
sin(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te)-cos(b37)*sin(ro2te))*hgmte);
da73tez=da73tez+db40*((-cos(b37)*cos(b40)*sin(ro1te)*
cos(ro2te)-cos(b37)*sin(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da73te=[da73tex;
da73tey;
da73tez];
da83tex=db37*(hbmte*cos(b37)*cos(b38)+(-cos(b38)*sin(b37)*
sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)+cos(b38)*sin(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*
cos(ro2te)+cos(b38)*cos(b37)*sin(ro2te))*hgmte);
da83tex=da83tex+db38*(-hbmte*sin(b37)*sin(b38)+((cos(b38)*
cos(b40)-sin(b38)*cos(b37)*sin(b40))*sin(ro1te)*cos(ro2te)+(cos(b38)*
sin(b40)+sin(b38)*cos(b37)*cos(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te)-sin(b38)*sin(b37)*sin(ro2te))*hgmte);
da83tex=da83tex+db40*(((-sin(b38)*sin(b40)+cos(b38)*cos(b37)*cos(b40))*sin(ro1te)*
cos(ro2te)+(sin(b38)*cos(b40)+cos(b38)*cos(b37)*
sin(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da83tey=db37*(hbmte*cos(b37)*sin(b38)+
(-sin(b38)*sin(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)+sin(b38)*sin(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*co
s(ro2te)+sin(b38)*cos(b37)*sin(ro2te))*hgmte);
da83tey=da83tey+db38*(hbmte*sin(b37)*cos(b38)+((sin(b38)*cos(b40)+cos(b38)*
cos(b37)*sin(b40))*sin(ro1te)*cos(ro2te)+(sin(b38)*
sin(b40)-cos(b38)*cos(b37)*cos(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te)+cos(b38)*sin(b37)*sin(ro2te))*hgmte);
da83tey=da83tey+db40*((cos(b38)*sin(b40)+sin(b38)*cos(b37)*cos(b40))*sin(ro1te)*
cos(ro2te)+(-cos(b38)*cos(b40)+sin(b38)*cos(b37)*sin(b40))*
cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da83te=[da83tex;
da83tey;
0];
da93te=[0;

```

```

0;
0];
da103tex=db37*((-sin(b38)*sin(b37)*cos(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)- sin(b38)*sin(b37)*
sin(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da103tex=da103tex+db38*((( - sin(b38)*sin(b40)+cos(b38)*cos(b37)*cos(b40))*sin(ro1te)*
cos(ro2te)+(sin(b38)*cos(b40)+ cos(b38)*cos(b37)*sin(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da103tex=da103tex+db40*(((cos(b38)*cos(b40)- sin(b38)*cos(b37)*
sin(b40))*sin(ro1te)*cos(ro2te)+(cos(b38)*sin(b40)+sin(b38)*cos(b37)*c os(b40))*cos(ro1te)*
cos(ro2te))*hgmte);
da103tey=db37*((cos(b38)*sin(b37)*cos(b40)*sin(ro1te)*
cos(ro2te)+cos(b38)*sin(b37)*sin( b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da103tey=da103tey+db38*(((cos(b38)*sin(b40)+sin(b38)*cos(b37)*cos(b40))*sin(ro1te)*
co s(ro2te)+(-cos(b38)*cos(b40)+sin(b38)*cos(b37)*sin(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da103tey=da103tey+db40*(((sin(b38)*cos(b40)+cos(b38)*
cos(b37)*sin(b40))*sin(ro1te)*co s(ro2te)+(sin(b38)*sin(b40)-cos(b38)*cos(b37)*cos(b40))*
cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da103tez=db37*((-cos(b37)*cos(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)- cos(b37)*sin(b40)*
cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da103tez=da103tez+db40*((sin(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)- sin(b37)*cos(b40)*
cos(ro1te)*cos(ro2te))*hgmte);
da103te=[da103tex;
da103tey;
da103tez];
db13te=[0;
0;
0];
db23te=[0;
0;
0];
db33te=[0;
0;
0];
db43te=[0;
0;
0];
db53tex=db37*(- sin(b38)*sin(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)+
sin(b38)*sin(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*co s(ro2te)+sin(b38)*
cos(b37)*sin(ro2te));
db53tex=db53tex+db38*((sin(b38)*cos(b40)+cos(b38)*cos(b37)*sin(b40))*sin(ro1te)*

```

```

cos(ro2te)+(sin(b38)*sin(b40)- cos(b38)*
cos(b37)*cos(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te)+cos(b38)*sin(b37)*sin(ro2te));
db53tex=db53tex+db40*((cos(b38)*sin(b40)+sin(b38)*cos(b37)*cos(b40))*sin(ro1te)*cos(r
o2te)+(-cos(b38)*
cos(b40)+sin(b38)*cos(b37)*sin(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te));
db53tey=db37*(cos(b38)*sin(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*
cos(ro2te)- cos(b38)*sin(b37)*cos(b40)*cos(ro1te)*cos(ro2te)-cos(b38)*cos(b37)*sin(ro2te));
db53tey=db53tey+db38*((- cos(b38)*cos(b40)+sin(b38)*cos(b37)*sin(b40))*sin(ro1te)*
cos(ro2te)+(-cos(b38)*sin(b40)- sin(b38)*cos(b37)*cos(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te)+sin(b38)*
sin(b37)*sin(ro2te));
db53tey=db53tey+db40*((sin(b38)*sin(b40)- cos(b38)*cos(b37)*
cos(b40))*sin(ro1te)*cos(ro2te)+(-sin(b38)*cos(b40)- cos(b38)*cos(b37)*
sin(b40))*cos(ro1te)*cos(ro2te));
db53tez=db37*(- cos(b37)*sin(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)+cos(b37)*cos(b40)*
cos(ro1te)*cos(ro2te)- sin(b37)*sin(ro2te));
db53tez=db53tez+db40*(-sin(b37)*cos(b40)*sin(ro1te)*cos(ro2te)- sin(b37)*sin(b40)*
cos(ro1te)*cos(ro2te));
db53te=[db53tex;
db53tey;
db53tez];
db63te=[0;
0;
0];
db73te=[-sin(b38)*db38;
cos(b38)*db38;
0];
db83te=[0;
0;
0];
db93te=[0;
0;
0];
db103te=[(cos(b37)*sin(b38)*db37+sin(b37)*cos(b38)*db38);
(- cos(b37)*cos(b38)*db37+sin(b37)*sin(b38)*db38);
-sin(b37)*db37];% derivada da Jacobina absoluta (DJate)
DJate=[da12te da22te da32te da42te da52te da62te da72te da82te da92te da102te
db32te db22te db32te db42te db52te db62te db72te db82te db92te db102te
da13te da23te da33te da43te da53te da63te da73te da83te da93te da103te
db33te db23te db33te db43te db53te db63te db73te db83te db93te db103te];

```

```

% determinação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) e sua derivada (Jgste e
DJgste)
Jgste=Jate*Jrte;
DJgste=DJate*Jrte+Jate*DJrte;
% Transformação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) para o referencial (XYZ)c
Jgcte=Roote*Jgste;%(12x2)
Jgte=[zeros(12,6) Jgcte
zeros(12,4)];
DJgcte=Roote*DJgste;
DJgte=[zeros(12,6) DJgcte
zeros(12,4)];
%Submatrizes da matriz MKR
L3te=Ac*r3tec;
L3tetil=[0 -L3te(3) L3te(2);
L3te(3) 0 -L3te(1);
-L3te(2) L3te(1) 0];% matriz antissimétrica de L3
K3te=[eye(3) -L3tetil;
zeros(3) eye(3)];
R3te=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
L7te=Ac*r7tec;
L7tetil=[0 -L7te(3) L7te(2);
L7te(3) 0 -L7te(1);
-L7te(2) L7te(1) 0];
% matriz antissimétrica de L7
K7te=[eye(3) -L7tetil;
zeros(3) eye(3)];
R7te=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
%Derivadas das submatrizes da matriz DMKR
DL3te=Ac*dr3tec+DAc*r3tec;
DL3tetil=[0 -DL3te(3) DL3te(2);
DL3te(3) 0 -DL3te(1);
-DL3te(2) DL3te(1) 0];% matriz antissimétrica de DL3
DK3te=[zeros(3) -DL3tetil;
zeros(3) zeros(3)];
DR3te=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
DL7te=Ac*dr7tec+DAc*r7tec;

```

```

DL7tetil=[0 -DL7te(3) DL7te(2);
DL7te(3) 0 -DL7te(1);
-DL7te(2) DL7te(1) 0];% matriz antissimétrica de DL7
DK7te=[zeros(3) -DL7tetil;
zeros(3) zeros(3)];
DR7te=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
% determinação do tensor de inércia de todos os corpos no referencial inercial
T3tei=(Ac*Rote*A3tefgh)*T3tecm*((A3tefgh.')(Rote.')(Ac.));
T7tei=(Ac*Rote*A3tefgh*A1te*A2te)*T7tecm*((A2te.')(A1te.')(A3tefgh.')(Rote.')(Ac.));
Ttei=[m3te*eye(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) T3tei zeros(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) m7te*eye(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3) T7tei];
% determinação dos vetores de velocidades angulares dos corpos em relação ao referencial
inercial
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
W3teitil=(Ac*DA3tec+DAc*A3tec)*((Ac*A3tec.));
W3teix=W3teitil(3,2);
W3teiy=W3teitil(1,3);
W3teiz=W3teitil(2,1);
W3tei=[W3teix;
W3teiy;
W3teiz];
% Corpo 7 (roda + pneu)
W7teitil=(Ac*DA7tec+DAc*A7tec)*((Ac*A7tec.));
W7teix=W7teitil(3,2);
W7teiy=W7teitil(1,3);
W7teiz=W7teitil(2,1);
W7tei=[W7teix;
W7teiy;
W7teiz];
% determinação do vetor de forças giroscópicas (bste)
bs3te=[zeros(3,1);
W3teitil*T3tei*W3tei];
bs7te=[zeros(3,1);
W7teitil*T7tei*W7tei];
bste=[bs3te;
bs7te]; % determinação da força da mola (Fmte)

```

```

if(escolhasusp == 1)
cinstte=ccompte-b32;
dmte=clivrete-cinstte;
fmte=kmte*dmte;
end
if(escolhasusp == 2)
dmte=b32;
fmte=2.416*10^4*exp(0.008371*dmte*1000)+67.33*exp(0.05772*dmte*1000);
end
if(escolhasusp == 3)
dmte=b32;
fmte=11.1196*(2.416*10^4*
exp(0.008371*dmte*1000)+67.33*exp(0.05772*dmte*1000));
end
% determinação da força do amortecedor (Fbte)
fate=bate*db32;
% determinação da força vertical provocada pela deflexão do pneu (Fpte)
r7tei=rci+Ac*r7tec;
rrtefgh4=[0;
0;
-rroda];
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial (fgh)4
rrtec=r7tec+Rote*A3tefgh*A1te*rrtefgh4;
rrtei=rci+Ac*rrtec;
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial inercial
rptefgh4=[0;
0;
-rroda-hp];
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial (fgh)4
rptei=r7tei+Ac*Rote*A3tefgh*A1te*rptefgh4;
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial inercial
if (rptei(3)<=0)
rptei(3)=0;
cinstpte=rrtei(3)-rptei(3);
% deformação do pneu
fbatpte=0;
if (rrtei(3)<=0.005)
fbatpte=kbatp*(0.005-rrtei(3));
end

```



```

fvpte=kp*(hp-cinstpte)+ fbatpte;
end
if (rptei(3)>0) % perda de contato com o solo
cinstpte=rrtei(3)-rptei(3);
fvpte=0;
end
% Determinação do ângulo de câmber
dte=r7tec-rrtec;
auxdte=sqrt(dte(2)^2+dte(3)^2);
udte=[0;
(dte(2)/auxdte);
(dte(3)/auxdte)];
gamate=acos(udte(3));
fvpte=fvpte/(cos(gamate));
% correção da força vertical devido ao ângulo de câmber
% SUSPENSÃO TRASEIRA DIREITA % determinação dos valores das coordenadas de
junta
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
b41=q41;
% ângulo entre a bandeja e o chassis
aux41=jcmtttd^2+jbmtttd^2+2*jbmtttd*(jcgtttd*sin(b41)-jchttd*cos(b41));
b42=pttd-sqrt(aux41);
% deslocamento da mola ou amortecedor a partir da configuração de curso máximo do
amortecedor
b43=acos((jchttd-jbmtttd*cos(b41))/(pttd-b42));
% 2o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo + cubo da roda)
b44=atan2(jcfttd,(-jbmtttd*sin(b41)-jcgtttd));% 1o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do
eixo + cubo da roda)
b45=q42;
qvolttd=0;
b49=0.304;
% determinação de b50 - 3o ângulo de Euler do corpo 3
a1tttd=2*fdmtttd*((clfttd-f2tttd*b49)*cos(b44)+(clgttd-g2tttd*b49)*sin(b44));
a2tttd=-2*fdmtttd*((clfttd-f2tttd*b49)*sin(b44)*cos(b43)-(clgttd-g2tttd*b49)*
cos(b44)*cos(b43)-(clhttd-h2tttd*b49)*sin(b43));
a3tttd=-clmtttd^2-(pttd-b42-fbmtttd)^2-fdmtttd^2+demttd^2- (f2tttd^2+g2tttd^2+h2tttd^2)*
b49^2+2*(clfttd*f2tttd+clgttd*g2tttd+clhttd*h2tttd)*b49-2*
(pttd-b42-fbmtttd)*((clfttd-f2tttd*b49)*sin(b44)*
sin(b43)-(clgttd-g2tttd*b49)*cos(b44)*sin(b43)+(clhttd-h2tttd*b49)*cos(b43));

```

```

a4ttd=a1ttd^2+a2ttd^2-a3ttd^2;
%discriminante da eq. do 2ograu que determina b50
if (a4ttd>=0)
x1ttd=(a1ttd*a3ttd+a2ttd*sqrt(a4ttd))/(a1ttd^2+a2ttd^2);
y1ttd=(a2ttd*a3ttd-a1ttd*sqrt(a4ttd))/(a1ttd^2+a2ttd^2);
x2ttd=(a1ttd*a3ttd-a2ttd*sqrt(a4ttd))/(a1ttd^2+a2ttd^2);
y2ttd=(a2ttd*a3ttd+a1ttd*sqrt(a4ttd))/(a1ttd^2+a2ttd^2);
b50a=(pi/2)*(sign(y1ttd)-1)+acos(sign(y1ttd)*x1ttd);
b50b=(pi/2)*(sign(y2ttd)-1)+acos(sign(y2ttd)*x2ttd);
end
b50=b50b;
% determinação das matrizes seleção de entradas modificadas (V21m e V22m) e das
matrizes jacobianas das restrições Jb21 e Jb22 (informação da geometria da suspensão e
da direção)
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
V41m=[1 0 % matriz seleção de entradas modificada
0 0
0 0
0 0
0 1];
jb4121=2*jbmttd*(jcgtd*cos(b41)+jchtd*sin(b41));
jb4122=2*(-b42+pttd);
jb4131=-jbmttd*sin(b41)/(pttd-b42);
jb4132=-(jchtd-jbmttd*cos(b41))/(pttd-b42)^2;
jb4133=-sin(b43);
jb4141=-jcgtd*jbmttd*cos(b41)/(-jbmttd*sin(b41)-jcgtd)^2;
jb4144=1+(tan(b44))^2;
Jb41=[1 0 0 0 0 % matriz jacobiana beta de restrições
jb4121 jb4122 0 0 0
jb4131 jb4132 jb4133 0 0
jb4141 0 0 jb4144 0
0 0 0 0 1];
V4m=V41m;% matriz seleção de entradas modificada
Jbttd=Jb41;
% matriz jacobiana beta de restrições
% determinação da matriz jacobiana relativa do mecanismo (Jr)
Jrttd=(inv(Jbttd))*V4m;
% determinação do vetor de velocidades das coordenadas de junta (db4)
db4=Jrttd*[dq41;

```

```

dq42];
db41=db4(1);
db42=db4(2);
db43=db4(3);
db44=db4(4);
db45=db4(5);
db50=0;
% determinação da derivada da matriz jacobiana beta do mecanismo(DJbtttd)
djb4121=2*jbmtttd*(-jcgtttd*sin(b41)+jchtttd*cos(b41))*db41;
djb4122=-2*db42;
djb4131=-jbmtttd*(cos(b41)*(pttd-b42)*db41+sin(b41)*db42)/(pttd-b42)^2;
djb4132=-db41*jbmtttd*sin(b41)/(pttd-b42)^2+2*db42*(-jchtttd+jbmtttd*cos(b41))/(pttd-
b42)^3;
djb4133=-(cos(b43))*db43;
djb4141=db41*(jcfttd*jbmtttd*sin(b41)/(-jbmtttd*sin(b41)-jcgtttd)^2- 2*jcfttd*
jbmtttd^2*cos(b41)^2/(-jbmtttd*sin(b41)-jcgtttd)^3);
djb4144=2*tan(b44)*(1+(tan(b44))^2)*db44;
DJb41=[0 0 0 0 0 % derivada da matriz jacobiana beta de restrições do 1otransformador
djb4121 djb4122 0 0 0
djb4131 djb4132 djb4133 0 0
djb4141 0 0 djb4144 0
0 0 0 0 0];
DJbtttd=DJb41;
% derivada da matriz jacobiana beta de restrições
% determinação da derivada da matriz jacobiana relativa(DJrtd)
djr421=(-djb4121*jb4122+jb4121*djb4122)/(jb4122)^2;
djr431=(-djb4131*jb4133+jb4131*djb4133)/jb4133^2;
djr431=djr431+(jb4122*jb4133*(jb4132*djb4121+djb4132*jb4121)- jb4121*jb4132*
(djb4133*jb4122+jb4133*djb4122))/(jb4133*jb4122)^2;
djr441=(-djb4141*jb4144+jb4141*djb4144)/jb4144^2;
% derivada da matriz jacobiana relativa
DJrtd=[0 0
djr421 0
djr431 0
djr441 0
0 0];
% CINEMÁTICA ABSOLUTA
% Posição e velocidade linear dos C.M. dos corpos em relação ao referencial do chassis
% Corpo 2 (bandeja)

```

```

A2ttdfgh=[1 0 0 % matriz transformação do corpo 2 para o referencial (fgh)
0 sin(b41) cos(b41)
0 -cos(b41) sin(b41)];
A2ttdc=Rottd*A2ttdfgh;
% matriz transformação do corpo 2 para o referencial (XYZ)c
DA2ttdfgh=db41*[0 0 0;
0 cos(b41) -sin(b41);
0 sin(b41) cos(b41)];
% derivada da matriz transformação do corpo 2 para o referencial (fgh)
DA2ttdc=Rottd*DA2ttdfgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 2 para o referencial (XYZ)c
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
A3ttdfgh=[(cos(b44)*cos(b50)-sin(b44)*cos(b43)*
sin(b50)) (-cos(b44)*sin(b50)- sin(b44)*
cos(b43)*cos(b50)) (sin(b44)*sin(b43)) (sin(b44)*
cos(b50)+cos(b44)*cos(b43)*sin(b50)) (- sin(b44)*
sin(b50)+cos(b44)*cos(b43)*cos(b50)) (-cos(b44)*sin(b43)) (sin(b43)*
sin(b50)) (sin(b43)*cos(b50)) (cos(b43))];
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh)
A3ttdc=Rottd*A3ttdfgh;
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (XYZ)c
r3tttd=[0;
0;
hbmttd];
% posição do C.M. em relação à junta esférica (ponto B)
r3ttdc=rrtttd+A2ttdc*[0;
-jbmttd;
0]+A3ttdc*r3tttd;
% posição do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% derivada da matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh)
DA3ttdfgh=db43*[sin(b44)*sin(b43)*sin(b50) sin(b44)*sin(b43)*cos(b50) sin(b44)*
cos(b43) -cos(b44)*sin(b43)*sin(b50) -cos(b44)*
sin(b43)*cos(b50) -cos(b44)*cos(b43) cos(b43)*
sin(b50) cos(b43)*cos(b50) -sin(b43)];
DA3ttdfgh=DA3ttdfgh+db44*[-sin(b44)*cos(b50)-cos(b44)*
cos(b43)*sin(b50) sin(b44)*sin(b50)-cos(b44)*
cos(b43)*cos(b50) cos(b44)*sin(b43) cos(b44)*cos(b50)-sin(b44)*
cos(b43)*sin(b50) -cos(b44)*sin(b50)- sin(b44)*cos(b43)*
cos(b50) sin(b44)*sin(b43) 0 0 0];

```

```

DA3ttdfgh=DA3ttdfgh+db50*[-cos(b44)*sin(b50)-sin(b44)*
cos(b43)*cos(b50) - cos(b44)*cos(b50)+sin(b44)*
cos(b43)*sin(b50) 0 -sin(b44)*sin(b50)+cos(b44)*
cos(b43)*cos(b50) -sin(b44)*cos(b50)- cos(b44)*cos(b43)*
sin(b50) 0 sin(b43)*cos(b50) -sin(b43)*sin(b50) 0];
DA3ttdc=Rottd*DA3ttdfgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 3 para o referencial (XYZ)c
dr3ttdc=DA2ttdc*[0;
-jbmttd;
0]+DA3ttdc*r3tttd;
% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% Corpo 7 (roda + pneu)
A2tttd=[cos(b45) sin(b45) 0;
0 0 1;
sin(b45) -cos(b45) 0];
% matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4
A1tttd=[cos(ro1tttd)
-sin(ro1tttd)*cos(ro2tttd)
sin(ro1tttd)*sin(ro2tttd)
sin(ro1tttd) cos(ro1tttd)*cos(ro2tttd)
-cos(ro1tttd)*sin(ro2tttd)
0 sin(ro2tttd) cos(ro2tttd)];
% matriz transformação do referencial (fgh)4 para o referencial (fgh)2
A7ttdfgh=A3ttdfgh*A1tttd*A2tttd;
% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (fgh)
A7ttdc=Rottd*A7ttdfgh;
% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
r7tttd=[0;
0;
hgmttd];
% posição do C.M. em relação ao referencial (fgh)2 (ponto H)
r7ttdc=rrtttd+A2ttdc*[0;
-jbmttd;
0]+A3ttdc*r3tttd+A7ttdc*r7tttd;
% posição do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
DA2tttd=db45*[-sin(b45) cos(b45) 0;
0 0 0;
cos(b45) sin(b45) 0];
% derivada da matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4

```

```

DA7ttdfgh=DA3ttdfgh*A1ttt*A2ttt+A3ttdfgh*A1ttt*DA2ttt;
DA7tttdc=Rotttt*DA7ttdfgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
dr7tttdc=DA2tttdc*[0;
-jbmttt;
0]+DA3tttdc*r3ttt+DA7tttdc*r7ttt;
% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% Jacobiana absoluta(Jatd) em relação ao referencial da suspensão (fgh)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
a12ttt=[0;
-jbmttt*cos(b41);
-jbmttt*sin(b41)];
a22ttt=[0;
0;
0];
a32ttt=[hbmttt*cos(b43)*sin(b44);
-hbmttt*cos(b43)*cos(b44);
-hbmttt*sin(b43)];
a42ttt=[hbmttt*sin(b43)*cos(b44);
hbmttt*sin(b43)*sin(b44);
0];
a52ttt=[0;
0;
0];
b12ttt=[0;
0;
0];
b22ttt=[0;
0;
0];
b32ttt=[cos(b44);
sin(b44);
0];
b42ttt=[0;
0;
1];
b52ttt=[0;
0;
0];

```

```

% Corpo 7 (roda + pneu)
a13ttd=[0;
-jbmttd*cos(b41);
-jbmttd*sin(b41)];
a23ttd=[0;
0;
0];
a33ttd=[hbmtd*cos(b43)*sin(b44)+(- sin(b44)*sin(b43)*sin(b50)*
sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+sin(b44)*sin(b43)*cos(b50)*
cos(ro1ttd)* cos(ro2ttd)+sin(b44)*cos(b43)*sin(ro2ttd))*
hgmttd -hbmtd*cos(b43)*cos(b44)+(cos(b44)*sin(b43)*
sin(b50)*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)- cos(b44)*
sin(b43)*cos(b50)*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)-cos(b44)*cos(b43)*sin(ro2ttd))*
hgmttd -hbmtd*sin(b43)+(- cos(b43)*sin(b50)*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+cos(b43)*
cos(b50)*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)- sin(b43)*sin(ro2ttd))*hgmttd];
a43ttd=[hbmtd*sin(b43)*cos(b44)+(-(-sin(b44)*cos(b50)- cos(b44)*
cos(b43)*sin(b50))*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+(sin(b44)*sin(b50)- cos(b44)*cos(b43)*
cos(b50))*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+cos(b44)*sin(b43)*sin(ro2ttd))*hgmttd
hbmtd*sin(b43)*sin(b44)+(-(cos(b44)*cos(b50)- sin(b44)*
cos(b43)*sin(b50))*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+(-cos(b44)*sin(b50)- sin(b44)*
cos(b43)*cos(b50))*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+sin(b44)*
sin(b43)*sin(ro2ttd))*hgmttd 0];
a53ttd=[0;
0;
0];
b13ttd=[0;
0;
0];
b23ttd=[0;
0;
0];
b33ttd=[cos(b44);
sin(b44);
0];
b43ttd=[0;
0;
1];
b53ttd=[(cos(b44)*cos(b50)-sin(b44)*cos(b43)*sin(b50))*
sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)-(- cos(b44)*sin(b50)-sin(b44)*

```

```

cos(b43)*cos(b50))*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)- sin(b44)*
sin(b43)*sin(ro2ttd) (sin(b44)*cos(b50)+cos(b44)*cos(b43)*sin(b50))*
sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)-(- sin(b44)*sin(b50)+cos(b44)*
cos(b43)*cos(b50))*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+cos(b44)*
sin(b43) *sin(ro2ttd) sin(b43)*sin(b50)*
sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)-sin(b43)*cos(b50)*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)- cos(b43)*sin(ro2ttd)];
% Jacobina absoluta (Jattd)
Jattd=[a12ttd a22ttd a32ttd a42ttd a52ttd
b12ttd b22ttd b32ttd b42ttd b52ttd
a13ttd a23ttd a33ttd a43ttd a53ttd b13ttd b23ttd b33ttd b43ttd b53ttd];
% derivada da Jacobiana absoluta(DJattd)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
da12ttd=[0;
jbmtd*sin(b41)*db41;
-jbmtd*cos(b41)*db41];
da22ttd=[0;
0;
0];
da32ttd=[hbmtd*(- sin(b43)*sin(b44)*
db43+cos(b43)*cos(b44)*db44);
hbmtd*(sin(b43)*cos(b44)*db43+cos(b43)*sin(b44)*db44);
-hbmtd*cos(b43)*db43];
da42ttd=[hbmtd*(cos(b43)*cos(b44)*db43- sin(b43)*sin(b44)*db44);
hbmtd*(cos(b43)*sin(b44)*db43+sin(b43)*cos(b44)*db44);
0];
da52ttd=[0;
0;
0];
db22ttd=[0;
0;
0];
db22ttd=[0;
0;
0];
db32ttd=[-sin(b44)*db44;
cos(b44)*db44;
0];
db42ttd=[0;
0;
0];

```



```

0];
db52ttd=[0;
0;
0];
% Corpo 7 (roda + pneu)
da13ttd=[0;
jbm ttd*sin(b41)*db41;
-jbm ttd*cos(b41)*db41];
da23ttd=[0;
0;
0];
da33ttdx=db43*(-hbm ttd*sin(b43)*sin(b44)+(- sin(b44)*cos(b43)*
sin(b50)*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+sin(b44)*cos(b43)*cos(b50)*
cos(ro1ttd) *cos(ro2ttd)-sin(b44)*sin(b43)*sin(ro2ttd))*hgm ttd);
da33ttdx=da33ttdx+db44*(hbm ttd*cos(b43)*
cos(b44)+(- cos(b44)*sin(b43)*sin(b50)*sin(ro1ttd)*
cos(ro2ttd)+cos(b44)*sin(b43)*cos(b50)*cos(ro1ttd) *
cos(ro2ttd)+cos(b44)*cos(b43)*sin(ro2ttd))*hgm ttd);
da33ttdx=da33ttdx+db50*((-sin(b44)*sin(b43)*cos(b50)*
sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)- sin(b44)*sin(b43)*
sin(b50)*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd))*hgm ttd);
da33ttdy=db43*(hbm ttd*sin(b43)*cos(b44)+(cos(b44)*
cos(b43)*sin(b50)*sin(ro1ttd)*cos(ro 2ttd)-cos(b44)*
cos(b43)*cos(b50)*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+cos(b44)*sin(b43)*sin(ro2ttd))*hgm ttd );
da33ttdy=da33ttdy+db44*(hbm ttd*cos(b43)*sin(b44)+(- sin(b44)*
sin(b43)*sin(b50)*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+sin(b44)*sin(b43)*cos(b50)*
cos(ro1ttd)* cos(ro2ttd)+sin(b44)*cos(b43)*sin(ro2ttd))*hgm ttd);
da33ttdy=da33ttdy+db50*((cos(b44)*sin(b43)*
cos(b50)*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+cos(b44)*si n(b43)*
sin(b50)*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd))*hgm ttd);
da33ttdz=db43*(-hbm ttd*cos(b43)+(sin(b43)*
sin(b50)*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)- sin(b43)*
cos(b50)*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)-cos(b43)*sin(ro2ttd))*hgm ttd);
da33ttdz=da33ttdz+db50*((-cos(b43)*cos(b50)*
sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)- cos(b43)*sin(b50)*
cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd))*hgm ttd);
da33ttd=[da33ttdx;
da33ttdy;
da33ttdz];

```

```

da43tt dx=db43*(hbmttd*cos(b43)*cos(b44)+(- cos(b44)*
sin(b43)*sin(b50)*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+cos(b44)*sin(b43)*cos(b50)*
cos(ro1ttd) *cos(ro2ttd)+cos(b44)*
cos(b43)*sin(ro2ttd))*hgmttd);
da43tt dx=da43tt dx+db44*(-hbmttd*sin(b43)*sin(b44)+((cos(b44)*cos(b50)- sin(b44)*
cos(b43)*sin(b50))*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+(cos(b44)*sin(b50)+sin(b44)*
cos(b43)* cos(b50))*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)-sin(b44)*sin(b43)*
sin(ro2ttd))*hgmttd);
da43tt dx=da43tt dx+db50*((( - sin(b44)*sin(b50)+cos(b44)*
cos(b43)*cos(b50))*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+(sin(b44)*
cos(b50) +cos(b44)*cos(b43)*sin(b50))*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd))*hgmttd);
da43tt dy=db43*(hbmttd*cos(b43)*sin(b44)+(- sin(b44)*sin(b43)*
sin(b50)*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+sin(b44)*sin(b43)*cos(b50)*
cos(ro1ttd)* cos(ro2ttd)+sin(b44)*cos(b43)*sin(ro2ttd))*hgmttd);
da43tt dy=da43tt dy+db44*(hbmttd*sin(b43)*
cos(b44)+((sin(b44)*cos(b50)+cos(b44)*cos(b43)*sin(b50))*
sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+(sin(b44)*sin(b50)- cos(b44)*cos(b43)*
cos(b50))*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+cos(b44)*
sin(b43)*sin(ro2ttd))*hgmttd);
da43tt dy=da43tt dy+db50*(((cos(b44)*sin(b50)+sin(b44)*
cos(b43)*cos(b50))*sin(ro1ttd)*cos(ro2ttd)+(- cos(b44)*
cos(b50)+sin(b44)*cos(b43)*sin(b50))*cos(ro1ttd)*cos(ro2ttd))*hgmttd);
da43tt d=[da43tt dx;
da43tt dy;
0];
da53tt d=[0;
0;
0];
db13tt d=[0;
0;
0];
db23tt d=[0;
0;
0];
db33tt d=[-sin(b44)*db44;
cos(b44)*db44;
0];
db43tt d=[0;
0;

```

```

0];
db53tttdx=db43*(sin(b44)*sin(b43)*sin(b50)*sin(ro1tttd)*cos(ro2tttd)- sin(b44)*sin(b43)*
cos(b50)*cos(ro1tttd)*cos(ro2tttd)-sin(b44)*cos(b43)*sin(ro2tttd));
db53tttdx=db53tttdx+db44*((-sin(b44)*cos(b50)- cos(b44)*
cos(b43)*sin(b50))*sin(ro1tttd)*cos(ro2tttd)-(sin(b44)*sin(b50)- cos(b44)*
cos(b43)*cos(b50))*cos(ro1tttd)*cos(ro2tttd)-cos(b44)*sin(b43)*sin(ro2tttd));
db53tttdx=db53tttdx+db50*((-cos(b44)*sin(b50)- sin(b44)*
cos(b43)*cos(b50))*sin(ro1tttd)*cos(ro2tttd)-(- cos(b44)*
cos(b50)+sin(b44)*cos(b43)*sin(b50))*cos(ro1tttd)*cos(ro2tttd));
db53tttdy=db43*(- cos(b44)*sin(b43)*sin(b50)*sin(ro1tttd)*
cos(ro2tttd)+cos(b44)*sin(b43)*cos(b50)*cos(ro1tttd) *
cos(ro2tttd)+cos(b44)*cos(b43)*sin(ro2tttd));
db53tttdy=db53tttdy+db44*((cos(b44)*cos(b50)- sin(b44)*
cos(b43)*sin(b50))*sin(ro1tttd)*cos(ro2tttd)-(-cos(b44)*sin(b50)- sin(b44)*
cos(b43)*cos(b50))*cos(ro1tttd)*cos(ro2tttd)-sin(b44)*sin(b43)*sin(ro2tttd));
db53tttdy=db53tttdy+db50*((- sin(b44)*sin(b50)+cos(b44)*cos(b43)*cos(b50))*
sin(ro1tttd)*cos(ro2tttd)-(- sin(b44)*
cos(b50)-cos(b44)*cos(b43)*sin(b50))*cos(ro1tttd)*cos(ro2tttd));
db53tttdz=db43*(cos(b43)*sin(b50)*sin(ro1tttd)*cos(ro2tttd)- cos(b43)*cos(b50)*
cos(ro1tttd)*cos(ro2tttd)+sin(b43)*sin(ro2tttd));
db53tttdz=db53tttdz+db50*(sin(b43)*cos(b50)*sin(ro1tttd)*
cos(ro2tttd)+sin(b43)*sin(b50)*cos (ro1tttd)*cos(ro2tttd));
db53tttd=[db53tttdx;
db53tttdy;
db53tttdz];
% derivada da Jacobina absoluta (DJatd)
DJattd=[da12tttd da22tttd da32tttd da42tttd da52tttd
db22tttd db22tttd db32tttd db42tttd db52tttd
da13tttd da23tttd da33tttd da43tttd da53tttd
db13tttd db23tttd db33tttd db43tttd db53tttd];
% determinação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) e sua derivada (Jgstd e
DJgstd)
Jgstd=Jattd*Jrttd;
DJgstd=DJattd*Jrttd+Jattd*DJrttd;
% Transformação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) para o referencial (XYZ)c
Jgcttd=Roottd*Jgstd;
%(12x2) Jgttd=[zeros(12,8) Jgcttd
zeros(12,2)];
DJgcttd=Roottd*DJgstd;

```

```

DJgtttd=[zeros(12,8) DJgcttd zeros(12,2)];
%Submatrizes da matriz MKR L3tttd=Ac*r3tttdc;
L3tttdtil=[0 -L3tttd(3) L3tttd(2);
L3tttd(3) 0 -L3tttd(1);
-L3tttd(2) L3tttd(1) 0];
% matriz antissimétrica td L3
K3tttd=[eye(3) -L3tttdtil;
zeros(3) eye(3)];
R3tttd=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
L7tttd=Ac*r7tttdc;
L7tttdtil=[0 -L7tttd(3) L7tttd(2);
L7tttd(3) 0 -L7tttd(1);
-L7tttd(2) L7tttd(1) 0];
% matriz antissimétrica td L7
K7tttd=[eye(3) -L7tttdtil;
zeros(3) eye(3)];
R7tttd=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
%Derivadas das submatrizes da matriz DMKR
DL3tttd=Ac*dr3tttdc+DAc*r3tttdc;
DL3tttdtil=[0 -DL3tttd(3) DL3tttd(2);
DL3tttd(3) 0 -DL3tttd(1);
-DL3tttd(2) DL3tttd(1) 0];
% matriz antissimétrica ttd DL3
DK3tttd=[zeros(3) -DL3tttdtil;
zeros(3) zeros(3)];
DR3tttd=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
DL7tttd=Ac*dr7tttdc+DAc*r7tttdc;
DL7tttdtil=[0 -DL7tttd(3) DL7tttd(2);
DL7tttd(3) 0 -DL7tttd(1);
-DL7tttd(2) DL7tttd(1) 0];
% matriz antissimétrica ttd DL7
DK7tttd=[zeros(3) -DL7tttdtil;
zeros(3) zeros(3)];
DR7tttd=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
% determinação do tensor de inércia de todos os corpos no referencial inercial

```

```

T3tttdi=(Ac*Rotttd*A3tttdfgh)*T3tttdcm*((A3tttdfgh.)*(Rotttd.)*(Ac.));
T7tttdi=(Ac*Rotttd*A3tttdfgh*A1tttd*A2tttd)*T7tttdcm*((A2tttd.)*(
(A1tttd.)*(A3tttdfgh.)*(Rotttd.)*(A c.));
Ttttdi=[m3tttd*eye(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) T3tttdi zeros(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) m7tttd*eye(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3)
T7tttdi];
% determinação dos vetores de velocidades angulares dos corpos em relação ao referencial
inercial
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
W3tttditil=(Ac*DA3tttdc+DAc*A3tttdc)*((Ac*A3tttdc.));
W3tttdix=W3tttditil(3,2);
W3tttdiy=W3tttditil(1,3);
W3tttdiz=W3tttditil(2,1);
W3tttdi=[W3tttdix;
W3tttdiy;
W3tttdiz];
% Corpo 7 (roda + pneu)
W7tttditil=(Ac*DA7tttdc+DAc*A7tttdc)*((Ac*A7tttdc.));
W7tttdix=W7tttditil(3,2);
W7tttdiy=W7tttditil(1,3);
W7tttdiz=W7tttditil(2,1);
W7tttdi=[W7tttdix;
W7tttdiy;
W7tttdiz];
% determinação do vetor de forças giroscópicas (bsttd)
bs3tttd=[zeros(3,1);
W3tttditil*T3tttdi*W3tttdi];
bs7tttd=[zeros(3,1);
W7tttditil*T7tttdi*W7tttdi];
bsttd=[bs3tttd;
bs7tttd];
% determinação da força da mola (Fmte)
if(escolhasusp == 1)
cinsttttd=ccompttd-b42;
dmttd=clivrettd-cinsttttd;
fmttd=kmttd*dmttd;
end

```

```

if(escolhasusp == 2)
dmttd=b42;
fmttd=2.391*10^4*exp(0.008617*dmttd*1000)+57.39*exp(0.05881*dmttd*1000);
end
if(escolhasusp == 3)
dmttd=b42;
fmttd=4.5438*(2.391*10^4*exp(0.008617*dmttd*1000)+57.39*exp(0.05881*dmttd*1000));
end
% determinação da força do amortecedor (Fbttd)
fattd=battd*db42;
% determinação da força vertical provocada pela deflexão do pneu (Fpttd)
r7ttidi=rci+Ac*r7ttidc;
rrttidfgh4=[0;
0;
-rroda];
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial (fgh)4
rrttidc=r7ttidc+Rottd*A3ttidfgh*A1ttid*rrttidfgh4;
rrttidi=rci+Ac*rrttidc;
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial inercial
rpttidfgh4=[0;
0;
-rroda-hp];
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial (fgh)4
rpttidi=r7ttidi+Ac*Rottd*A3ttidfgh*A1ttid*rpttidfgh4;
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial inercial xsolottd=0;
xsolotte=0;
if (rpttidi(3)<=xsolottd) rpttidi(3)=xsolottd;
cinstpttd=rrttidi(3)-rpttidi(3);
% deformação do pneu
fbatpttd=0;
if (rrttidi(3)<=0.005)
fbatpttd=kbatp*(0.005-rrttidi(3));
end
fvpttd=kp*(hp-cinstpttd+xsolottd)+ fbatpttd;
end
if (rpttidi(3)>0) % perda de contato com o solo
cinstpttd=rrttidi(3)-rpttidi(3);
fvpttd=0;
end

```

```

% Determinação do ângulo de câmber dttd=r7ttde-rrttde;
auxdttd=sqrt(dttd(2)^2+dttd(3)^2);
udttd=[0;
(dttd(2)/auxdttd);
(dttd(3)/auxdttd)];
gamattd=acos(udttd(3));
fvpttd=fvpttd/(cos(gamattd));
% correção da força vertical devido ao ângulo de câmber
% SUSPENSÃO TRASEIRA ESQUERDA
% Determinação dos valores das coordenadas de junta
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO)
b51=q51;% ângulo entre a bandeja e o chassis
aux51=jcmtte^2+jbmtte^2-2*jbmtte*(jcgte*sin(b51)+jchte*cos(b51));
b52=ptte-sqrt(aux51);
% deslocamento da mola ou amortecedor a partir da configuração de curso máximo do
amortecedor
b53=acos((jchte-jbmtte*cos(b51))/(ptte-b52));
% 2o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo + cubo da roda)
b54=atan2(jcftte,(jbmtte*sin(b51)-jcgte));
% 1o ângulo de Euler do corpo 3 (manga do eixo + cubo da roda)
b55=q52;
qvoltte=0;
b59=0.304;
% determinação de b60 - 3o ângulo de Euler do corpo 3
a1tte=-2*fdmtte*((clftte+f2tte*b59)*cos(b54)+(clgtte+g2tte*b59)*sin(b54));
a2tte=2*fdmtte*((clftte+f2tte*b59)*sin(b54)*
cos(b53)- (clgtte+g2tte*b59)*cos(b54)*cos(b53)-(clhte+h2tte*
b59)*sin(b53));
a3tte=-clmtte^2-(ptte-b52-fbmtte)^2-fdmtte^2+demtte^2- (f2tte^2+g2tte^2+h2tte^2)*
b59^2-2*(clftte*f2tte+clgtte*g2tte+clhte*
h2tte)*b59-2*(ptte-b52-fbmtte)*((clftte+f2tte*b59)*sin(b54)*
sin(b53)- (clgtte+g2tte*b59)*
cos(b54)*sin(b53)+(clhte+h2tte*b59)*cos(b53));
a4tte=a1tte^2+a2tte^2-a3tte^2;
%discriminantte da eq. do 2ograu que dettemina b60
if (a4tte>=0)
x1tte=(a1tte*a3tte+a2tte*sqrt(a4tte))/(a1tte^2+a2tte^2);
y1tte=(a2tte*a3tte-a1tte*sqrt(a4tte))/(a1tte^2+a2tte^2);
x2tte=(a1tte*a3tte-a2tte*sqrt(a4tte))/(a1tte^2+a2tte^2);

```

```

y2tte=(a2tte*a3tte+a1tte*sqrt(a4tte))/(a1tte^2+a2tte^2);
b60a=(pi/2)*(sign(y1tte)-1)+acos(sign(y1tte)*x1tte);
b60b=(pi/2)*(sign(y2tte)-1)+acos(sign(y2tte)*x2tte);
end
b60=b60a;
% determinação das matrizes seleção de entradas modificadas (V31m e V32m) e das
matrizes jacobianas das restrições Jb31 e Jb32 (informação da geometria da suspensão e
da direção)
% 1o TRANSFORMADOR (SUSPENSÃO) V51m=[1 0 % matriz seleção de entradas
modificada
0 0
0 0
0 0
0 1];
jb5121=2*jbmtte*(jcgte*cos(b51)-jchte*sin(b51));
jb5122=2*(b52-ptte);
jb5131=-jbmtte*sin(b51)/(ptte-b52);
jb5132=-(jchte-jbmtte*cos(b51))/(ptte-b52)^2;
jb5133=-sin(b53);
jb5141=jcftte*jbmtte*cos(b51)/(jbmtte*sin(b51)-jcgte)^2;
jb5144=1+(tan(b54))^2;
Jb51=[1 0 0 0 0 % matriz jacobiana beta de restrições
jb5121 jb5122 0 0 0
jb5131 jb5132 jb5133 0 0
jb5141 0 0 jb5144 0
0 0 0 0 1];
V5m=V51m;% matriz seleção de entradas modificada
Jbte=Jb51;% matriz jacobiana beta de restrições
% determinação da matriz jacobiana relativa do mecanismo (Jr)
Jrtte=(inv(Jbte))*V5m;
% determinação do vetor de velocidades das coordenadas de junta (db1)
db5=Jrtte*[dq51;
dq52];
db51=db5(1);
db52=db5(2);
db53=db5(3);
db54=db5(4);
db55=db5(5);
db60=0;

```



```

% determinação da derivada da matriz jacobiana beta do mecanismo(DJbte)
djb5121=2*jbmtte*(-jcgte*sin(b51)-jchte*cos(b51))*db51;
djb5122=2*db52;
djb5131=-jbmtte*(cos(b51)*(ptte-b52)*db51+sin(b51)*db52)/(ptte-b52)^2;
djb5132=-db51*jbmtte*sin(b51)/(ptte-b52)^2+2*db52*(-jchte+jbmtte*
cos(b51))/(ptte- b52)^3;
djb5133=-(cos(b53))*db53;
djb5141=db51*(jcftte*jbmtte*sin(b51)/(jbmtte*
sin(b51)-jcgte)^2- 2*jcftte*
jbmtte^2*cos(b51)^2/(jbmtte*
sin(b51)-jcgte)^3);
djb5144=2*tan(b54)*
(1+(tan(b54))^2)*db54;
DJb51=[0 0 0 0 0 % derivada da matriz jacobiana beta de restrições do 1otransformador
djb5121 djb5122 0 0 0
djb5131 djb5132 djb5133 0 0
djb5141 0 0 djb5144 0
0 0 0 0 0];
DJbte=DJb51;
% derivada da matriz jacobiana beta de restrições
% determinação da derivada da matriz jacobiana relativa(DJrte)
djr521=(-djb5121*jb5122+jb5121*djb5122)/(jb5122)^2;
djr531=(-djb5131*jb5133+jb5131*djb5133)/jb5133^2;
djr531=djr531+(jb5122*jb5133*(jb5132*djb5121+djb5132*
jb5121)- jb5121*jb5132*(djb5133*jb5122+jb5133*djb5122))/(jb5133*
jb5122)^2;
djr541=(-djb5141*jb5144+jb5141*djb5144)/jb5144^2;
% derivada da matriz jacobiana relativa DJrte=[0 0
djr521 0
djr531 0
djr541 0
0 0];

% CINEMÁTICA ABSOLUTA
% Posição e velocidade linear dos C.M. dos corpos em relação ao referencial do chassis
% Corpo 2 (bandeja)
A2ttefgh=[1 0 0 % matriz transformação do corpo 2 para o referencial (fgh)
0 sin(b51) -cos(b51)
0 cos(b51) sin(b51)];

```

```

A2ttec=Rotte*A2ttefgh;
% matriz transformação do corpo 2 para o referencial (XYZ)c
DA2ttefgh=db51*[0 0 0;
0 cos(b51) sin(b51);
0 -sin(b51) cos(b51)];
% derivada da matriz transformação do corpo 2 para o referencial (fgh)
DA2ttec=Rotte*DA2ttefgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 2 para o referencial (XYZ)c
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
A3ttefgh=[(cos(b54)*cos(b60)-sin(b54)*cos(b53)*sin(b60)) (-cos(b54)*
sin(b60)- sin(b54)*cos(b53)*cos(b60)) (sin(b54)*
sin(b53)) (sin(b54)*cos(b60)+cos(b54)*cos(b53)*
sin(b60)) (- sin(b54)*sin(b60)+cos(b54)*cos(b53)*
cos(b60)) (-cos(b54)*sin(b53)) (sin(b53)*sin(b60)) (sin(b53)*cos(b60)) (cos(b53))];
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh) A3ttec=Rotte*A3ttefgh;
% matriz transformação do corpo 3 para o referencial (XYZ)c
r3tte=[0;
0;
hbmte];
% posição do C.M. em relação à junta esférica (ponto B)
r3ttec=rrtte+A2ttec*[0;
jbmte;
0]+A3ttec*r3tte;
% posição do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% derivada da matriz transformação do corpo 3 para o referencial (fgh)
DA3ttefgh=db53*[sin(b54)*sin(b53)*sin(b60) sin(b54)*
sin(b53)*cos(b60) sin(b54)*cos(b53) -cos(b54)*sin(b53)*
sin(b60) -cos(b54)*sin(b53)*cos(b60) -cos(b54)*
cos(b53) cos(b53)*sin(b60) cos(b53)*cos(b60) -sin(b53)];
DA3ttefgh=DA3ttefgh+db54*[-sin(b54)*cos(b60)-cos(b54)*
cos(b53)*sin(b60) sin(b54)*sin(b60)-cos(b54)*
cos(b53)*cos(b60) cos(b54)*sin(b53) cos(b54)*cos(b60)-sin(b54)*
cos(b53)*sin(b60) -cos(b54)*sin(b60)- sin(b54)*cos(b53)*
cos(b60) sin(b54)*sin(b53) 0 0 0];
DA3ttefgh=DA3ttefgh+db60*[-cos(b54)*sin(b60)-sin(b54)*cos(b53)*
cos(b60) - cos(b54)*cos(b60)+sin(b54)*
cos(b53)*sin(b60) 0 -sin(b54)*sin(b60)+cos(b54)*
cos(b53)*cos(b60) -sin(b54)*cos(b60)- cos(b54)*cos(b53)*
sin(b60) 0 sin(b53)*cos(b60) -sin(b53)*sin(b60) 0];

```

```

DA3ttec=Rotte*DA3ttefgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 3 para o referencial (XYZ)c
dr3ttec=DA2ttec*[0;
jbmte;
0]+DA3ttec*r3tte;
% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% Corpo 7 (roda + pneu)
A1tte=[cos(ro1tte)
-sin(ro1tte)*cos(ro2tte)
sin(ro1tte)*sin(ro2tte)
sin(ro1tte) cos(ro1tte)*cos(ro2tte)
-cos(ro1tte)*sin(ro2tte)
0 sin(ro2tte) cos(ro2tte)];
% matriz transformação do referencial (fgh)4 para o referencial (fgh)2
A2tte=[cos(b55) -sin(b55) 0;
0 0 1;
-sin(b55) -cos(b55) 0];
% matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4
A7ttefgh=A3ttefgh*A1tte*A2tte;
% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (fgh)
A7ttec=Rotte*A7ttefgh;
% matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
r7tte=[0;
0;
hgmte];
% posição do C.M. em relação ao referencial (fgh)4 (ponto H)
r7ttec=rrtte+A2ttec*[0;
jbmte;
0]+A3ttec*r3tte+A7ttec*r7tte;
% posição do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
DA2tte=db55*[-sin(b55) -cos(b55) 0;
0 0 0;
-cos(b55) sin(b55) 0];
% derivada da matriz transformação do referencial (fgh)5 para o referencial (fgh)4
DA7ttefgh=DA3ttefgh*A1tte*A2tte+A3ttefgh*A1tte*DA2tte;
DA7ttec=Rotte*DA7ttefgh;
% derivada da matriz transformação do corpo 7 para o referencial (XYZ)c
dr7ttec=DA2ttec*[0;
jbmte;

```

```
0]+DA3ttec*r3tte+DA7ttec*r7tte;
% velocidade linear do C.M. em relação ao referencial do chassis (XYZ)c
% Jacobiana absoluta(Jate) em relação ao referencial da suspensão (fgh)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
a12tte=[0;
jbmtte*cos(b51);
-jbmtte*sin(b51)];
a22tte=[0;
0;
0];
a32tte=[hbmtte*cos(b53)*sin(b54);
-hbmtte*cos(b53)*cos(b54);
-hbmtte*sin(b53)];
a42tte=[hbmtte*sin(b53)*cos(b54);
hbmtte*sin(b53)*sin(b54);
0];
a52tte=[0;
0;
0];
b32tte=[0;
0;
0];
b22tte=[0;
0;
0];
b32tte=[cos(b54);
sin(b54);
0];
b42tte=[0;
0;
1];
b52tte=[0;
0;
0];
% Corpo 7 (roda + pneu)
a13tte=[0;
jbmtte*cos(b51);
-jbmtte*sin(b51)];
a23tte=[0;
```

```

0;
0];
a33tte=[hbmte*cos(b53)*sin(b54)+(- sin(b54)*sin(b53)*
sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+sin(b54)*sin(b53)*cos(b60)*cos(ro1tte)*
cos(ro2tte)+sin(b54)*cos(b53)*sin(ro2tte))*
hgmte -hbmte*cos(b53)*cos(b54)+(cos(b54)*sin(b53)*
sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)- cos(b54)*
sin(b53)*cos(b60)*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)-cos(b54)*cos(b53)*sin(ro2tte))*
hgmte -hbmte*sin(b53)+(- cos(b53)*sin(b60)*
sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+cos(b53)*cos(b60)*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)- sin(b53)*
sin(ro2tte))*hgmte];
a43tte=[hbmte*sin(b53)*cos(b54)+(-(-sin(b54)*
cos(b60)- cos(b54)*cos(b53)*sin(b60))*sin(ro1tte)*
cos(ro2tte)+(sin(b54)*sin(b60)- cos(b54)*
cos(b53)*cos(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)+cos(b54)*sin(b53)*sin(ro2tte))*
hgmte e hbmte*sin(b53)*
sin(b54)+(-(cos(b54)*cos(b60)- sin(b54)*cos(b53)*
sin(b60))*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(-cos(b54)*sin(b60)- sin(b54)*
cos(b53)*cos(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)+sin(b54)*sin(b53)*sin(ro2tte))*
hgmte 0];
a53tte=[0;
0;
0];
b33tte=[0;
0;
0];
b23tte=[0;
0;
0];
b33tte=[cos(b54);
sin(b54);
0];
b43tte=[0;
0;
1];
b53tte=[-(cos(b54)*cos(b60)-sin(b54)*cos(b53)*sin(b60))*
sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(- cos(b54)*
sin(b60)- sin(b54)*cos(b53)*cos(b60))*cos(ro1tte)*
cos(ro2tte)+sin(b54)*sin(b53)*sin(ro2tte) -(sin(b54)*

```

```

cos(b60)+cos(b54)*cos(b53)*sin(b60))*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(- sin(b54)*
sin(b60)+cos(b54)*cos(b53)*cos(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)- cos(b54)*
sin(b53)*sin(ro2tte) - sin(b53)*
sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+sin(b53)*cos(b60)*cos(ro1tte)*
cos(ro2tte)+cos(b5 3)*sin(ro2tte)];
% Jacobina absoluta (Jate)
Jatte=[a12tte a22tte a32tte a42tte a52tte
b32tte b22tte b32tte b42tte b52tte
a13tte a23tte a33tte a43tte a53tte
b33tte b23tte b33tte b43tte b53tte];
% derivada da Jacobiana absoluta(DJate)
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
da12tte=[0;
-jbmtte*sin(b51)*db51;
-jbmtte*cos(b51)*db51];
da22tte=[0;
0;
0];
da32tte=[hbmtte*(- sin(b53)*sin(b54)*db53+cos(b53)*cos(b54)*db54);
hbmtte*(sin(b53)*cos(b54)*db53+cos(b5 3)*sin(b54)*db54);
-hbmtte*cos(b53)*db53];
da42tte=[hbmtte*(cos(b53)*cos(b54)*db53- sin(b53)*sin(b54)*db54);
hbmtte*(cos(b53)*sin(b54)*db53+sin(b53)*cos(b54)*db54);
0];
da52tte=[0;
0;
0];
db32tte=[0;
0;
0];
db22tte=[0;
0;
0];
db32tte=[-sin(b54)*db54;
cos(b54)*db54;
0];
db42tte=[0;
0;
0];

```

```

db52tte=[0;
0;
0];
% Corpo 7 (roda + pneu) da13tte=[0;
-jbmtte*sin(b51)*db51;
-jbmtte*cos(b51)*db51];
da23tte=[0;
0;
0];
da33ttex=db53*(-hbmtte*sin(b53)*sin(b54)+(- sin(b54)*
cos(b53)*sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+sin(b54)*cos(b53)*cos(b60)*
cos(ro1tte) *cos(ro2tte)-sin(b54)*sin(b53)*sin(ro2tte))*hgmtte);
da33ttex=da33ttex+db54*(hbmtte*cos(b53)*cos(b54)+(- cos(b54)*
sin(b53)*sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+cos(b54)*sin(b53)*cos(b60)*
cos(ro1tte) *cos(ro2tte)+cos(b54)*cos(b53)*sin(ro2tte))*hgmtte);
da33ttex=da33ttex+db60*((-sin(b54)*sin(b53)*cos(b60)*
sin(ro1tte)*cos(ro2tte)- sin(b54)*sin(b53)*
sin(b60)*cos(ro1tte)*cos(ro2tte))*hgmtte);
da33ttexy=db53*(hbmtte*sin(b53)*cos(b54)+(cos(b54)*
cos(b53)*sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro 2tte)- cos(b54)*cos(b53)*
cos(b60)*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)+cos(b54)*sin(b53)*sin(ro2tte))*hgmtte );
da33ttexy=da33ttexy+db54*(hbmtte*cos(b53)*sin(b54)+(- sin(b54)*sin(b53)*
sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+sin(b54)*sin(b53)*cos(b60)*cos(ro1tte)*
cos(ro2tte)+sin(b54)*cos(b53)*sin(ro2tte))*hgmtte);
da33ttexy=da33ttexy+db60*((cos(b54)*sin(b53)*cos(b60)*
sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+cos(b54)*si n(b53)*sin(b60)*cos(ro1tte)*cos(ro2tte))*hgmtte);
da33ttetz=db53*(-hbmtte*cos(b53)+(sin(b53)*sin(b60)*
sin(ro1tte)*cos(ro2tte)- sin(b53)*cos(b60)*
cos(ro1tte)*cos(ro2tte)-cos(b53)*sin(ro2tte))*hgmtte);
da33ttetz=da33ttetz+db60*
((-cos(b53)*cos(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)- cos(b53)*sin(b60)*
cos(ro1tte)*cos(ro2tte))*hgmtte);
da33tte=[da33ttex;
da33ttexy;
da33ttetz];
da43ttex=db53*(hbmtte*cos(b53)*cos(b54)+(- cos(b54)*sin(b53)*
sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+cos(b54)*sin(b53)*cos(b60)*
cos(ro1tte) *cos(ro2tte)+cos(b54)*cos(b53)*sin(ro2tte))*hgmtte);
da43ttex=da43ttex+db54*(-hbmtte*sin(b53)*sin(b54)+((cos(b54)*cos(b60)- sin(b54)*

```

```

cos(b53)*sin(b60))*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(cos(b54)*sin(b60)+sin(b54)*
cos(b53)* cos(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)-sin(b54)*
sin(b53)*sin(ro2tte))*hgmtte);
da43ttex=da43ttex+db60*((( - sin(b54)*sin(b60)+cos(b54)*cos(b53)*cos(b60))*
sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(sin(b54)*cos(b60) +cos(b54)*
cos(b53)*sin(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte))*hgmtte);
da43ttexy=db53*(hgmtte*cos(b53)*sin(b54)+(- sin(b54)*
sin(b53)*sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+sin(b54)*sin(b53)*cos(b60)*
cos(ro1tte)* cos(ro2tte)+sin(b54)*cos(b53)*sin(ro2tte))*hgmtte);
da43ttexy=da43ttexy+db54*(hgmtte*sin(b53)*cos(b54)+((sin(b54)*cos(b60)+cos(b54)*
cos(b53)*sin(b60))*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(sin(b54)*
sin(b60)- cos(b54)*cos(b53)*cos(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)+cos(b54)*
sin(b53)*sin(ro2tte))*hgmtte);
da43ttexy=da43ttexy+db60*(((cos(b54)*sin(b60)+sin(b54)*
cos(b53)*cos(b60))*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(- cos(b54)*cos(b60)+sin(b54)*
cos(b53)*sin(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte))*hgmtte);
da43tte=[da43ttex;
da43ttexy;
0];
da53tte=[0;
0;
0];
db33tte=[0;
0;
0];
db23tte=[0;
0;
0];
db33tte=[-sin(b54)*db54;
cos(b54)*db54;
0];
db43tte=[0;
0;
0];
db53ttex=db53*(- sin(b54)*sin(b53)*
sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+sin(b54)*sin(b53)*cos(b60)*cos(ro1tte)*
cos(ro2tte)+sin(b54)*cos(b53)*sin(ro2tte));
db53ttex=db53ttex+db54*((sin(b54)*cos(b60)+cos(b54)*
cos(b53)*sin(b60))*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(sin(b54)*

```



```

sin(b60)- cos(b54)*cos(b53)*cos(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)+cos(b54)*
sin(b53)*sin(ro2tte));
db53ttex=db53ttex+db60*((cos(b54)*sin(b60)+sin(b54)*
cos(b53)*cos(b60))*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(-cos(b54)*
cos(b60)+sin(b54)*cos(b53)*sin(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte));
db53ttey=db53*(cos(b54)*sin(b53)*sin(b60)*sin(ro1tte)*
cos(ro2tte)- cos(b54)*sin(b53)*cos(b60)*cos(ro1tte)*
cos(ro2tte)-cos(b54)*cos(b53)*sin(ro2tte));
db53ttez=db53ttez+db54*((- cos(b54)*
cos(b60)+sin(b54)*cos(b53)*sin(b60))*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(- cos(b54)*
sin(b60)- sin(b54)*cos(b53)*cos(b60))*cos(ro1tte)*
cos(ro2tte)+sin(b54)*sin(b53)*sin(ro2tte));
db53ttey=db53ttey+db60*((sin(b54)*sin(b60)- cos(b54)*
cos(b53)*cos(b60))*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+(-sin(b54)*cos(b60)- cos(b54)*
cos(b53)*sin(b60))*cos(ro1tte)*cos(ro2tte));
db53ttez=db53*(- cos(b53)*sin(b60)*sin(ro1tte)*cos(ro2tte)+cos(b53)*
cos(b60)*cos(ro1tte)*cos(ro2tte)- sin(b53)*sin(ro2tte));
db53ttez=db53ttez+db60*(-sin(b53)*cos(b60)*
sin(ro1tte)*cos(ro2tte)- sin(b53)*sin(b60)*cos(ro1tte)*cos(ro2tte));
db53tte=[db53ttex;
db53ttey;
db53ttez];
% derivada da Jacobina absoluta (DJate)
DJatte=[da12tte da22tte da32tte da42tte da52tte
db32tte db22tte db32tte db42tte db52tte
da13tte da23tte da33tte da43tte da53tte
db33tte db23tte db33tte db43tte db53tte];
% determinação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) e sua derivada (Jgste e
DJgste)
Jgstte=Jatte*Jrtte;
DJgstte=DJatte*Jrtte+Jatte*DJrtte;
% Transformação da matriz jacobiana global no referencial (fgh) para o referencial (XYZ)c
Jgctte=Rootte*Jgstte;
%(12x2) Jgtte=[zeros(12,10) Jgctte];
DJgctte=Rootte*DJgstte;
DJgtte=[zeros(12,10) DJgctte];
%Submatrizes da matriz MKR
L3tte=Ac*r3ttec;
L3ttetil=[0 -L3tte(3) L3tte(2)];

```

```

L3tte(3) 0 -L3tte(1);
-L3tte(2) L3tte(1) 0];% matriz antissimétrica de L3
K3tte=[eye(3) -L3ttetil;
zeros(3) eye(3)];
R3tte=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
L7tte=Ac*r7ttec;
L7ttetil=[0 -L7tte(3) L7tte(2);
L7tte(3) 0 -L7tte(1);
-L7tte(2) L7tte(1) 0];
% matriz antissimétrica de L7
K7tte=[eye(3) -L7ttetil;
zeros(3) eye(3)];
R7tte=[Ac zeros(3);
zeros(3) Ac];
%Derivadas das submatrizes da matriz DMKR
DL3tte=Ac*dr3ttec+DAc*r3ttec;
DL3ttetil=[0 -DL3tte(3) DL3tte(2);
DL3tte(3) 0 -DL3tte(1);
-DL3tte(2) DL3tte(1) 0];
% matriz antissimétrica de DL3
DK3tte=[zeros(3) -DL3ttetil;
zeros(3) zeros(3)];
DR3tte=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
DL7tte=Ac*dr7ttec+DAc*r7ttec;
DL7ttetil=[0 -DL7tte(3) DL7tte(2);
DL7tte(3) 0 -DL7tte(1);
-DL7tte(2) DL7tte(1) 0];
% matriz antissimétrica de DL7
DK7tte=[zeros(3) -DL7ttetil;
zeros(3) zeros(3)];
DR7tte=[DAc zeros(3);
zeros(3) DAc];
% determinação do ttensor de inércia de todos os corpos no referencial inercial
T3ttei=(Ac*Rotte*A3ttefgh)*T3ttecm*((A3ttefgh.)*
(Rotte.)*(Ac.));
T7ttei=(Ac*Rotte*A3ttefgh*A1tte*A2tte)*T7ttecm*
((A2tte.)*(A1tte.)*(A3ttefgh.)*(Rotte.)*(A c.));

```

```

Tttei=[m3tte*eye(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3)
zeros(3) T3ttei zeros(3) zeros(3) zeros(3) zeros(3) m7tte*eye(3) zeros(3)
zeros(3) zeros(3) zeros(3) T7ttei];
% determinação dos vetores de velocidades angulares dos corpos em relação ao referencial
inercial
W3tteitil=(Ac*DA3ttec+DAc*A3ttec)*((Ac*A3ttec).');
W3tteix=W3tteitil(3,2);
W3tteiy=W3tteitil(1,3);
W3tteiz=W3tteitil(2,1);
W3ttei=[W3tteix;
W3tteiy;
W3tteiz];
% Corpo 7 (roda + pneu)
W7tteitil=(Ac*DA7ttec+DAc*A7ttec)*((Ac*A7ttec).');
W7tteix=W7tteitil(3,2);
W7tteiy=W7tteitil(1,3);
W7tteiz=W7tteitil(2,1);
W7ttei=[W7tteix;
W7tteiy;
W7tteiz];
% determinação do vetor de forças giroscópicas (bstte)
%bs2tte=[zeros(3,1);
W2tteitil*T2ttei*W2ttei];
bs3tte=[zeros(3,1);
W3tteitil*T3ttei*W3ttei];
bs7tte=[zeros(3,1);
W7tteitil*T7ttei*W7ttei];
bstte=[bs3tte;
bs7tte];
% determinação da força da mola (Fmtte)
if(escolhasusp == 1)
cinsttte=ccomptte-b52;
dmtte=clivrette-cinsttte;
fmtte=kmtte*dmtte;
end if(escolhasusp == 2)
dmtte=b52;
fmtte=2.391*10^4*exp(0.008617*dmtte*1000)+57.39*exp(0.05881*dmtte*1000);
end
if(escolhasusp == 3)

```

```

dmtte=b52;
fmtte=4.5438*(2.391*10^4*
exp(0.008617*dmtte*1000)+57.39*exp(0.05881*dmtte*1000));
end
% determinação da força do amortecedor (Fbtte)
fatte=batte*db52;
% determinação da força vertical provocada pela deflexão do pneu (Fptte)
r7ttei=rci+Ac*r7ttec;
rrttefgh4=[0;
0;
-rroda];
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial (fgh)4
rrttec=r7ttec+Rotte*A3ttefgh*A1tte*rrttefgh4;
rrttei=rci+Ac*rrttec;
% vetor posição do ponto inferior da roda no referencial inercial
rpttefgh4=[0;
0;
-rroda-hp];
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial (fgh)4
rpttei=r7ttei+Ac*Rotte*A3ttefgh*A1tte*rpttefgh4;
% vetor posição do ponto inferior do pneu indeformado no referencial inercial
if (rpttei(3)<=xsolotte) rpttei(3)=xsolotte;
cinstppte=rrttei(3)-rpttei(3);
% deformação do pneu
fbatppte=0;
if (rrttei(3)<=0.005)
fbatppte=kbatp*(0.005-rrttei(3));
end
fvptte=kp*(hp-cinstppte)+ fbatppte;
end
if (rpttei(3)>0) % perda de contato com o solo
cinstppte=rrttei(3)-rpttei(3);
fvptte=0;
end
% Determinação do ângulo de câmber
dtte=r7ttec-rrttec;
auxdtte=sqrt(dtte(2)^2+dtte(3)^2);
udtte=[0;
(dtte(2)/auxdtte);

```

```

(dtte(3)/auxdtte)];
gamatte=acos(udtte(3));
fvptte=fvptte/(cos(gamatte));
% correção da força vertical devido ao ângulo de câmber
% ACOPLAMENTO DAS SUSPENSÕES AO CHASSIS
%Determinação da matriz MKR
MKR= [eye(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) K3dd R3dd zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) K7dd zeros(6) R7dd
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) K3de zeros(6)
zeros(6) R3de zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
K7de zeros(6) zeros(6) zeros(6) R7de zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) K3td zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) R3td zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) K7td zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) R7td zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) K3te
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) R3te zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) K7te zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) R7te
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) K3ttd zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) R3ttd
zeros(6) zeros(6)
zeros(6) K7ttd zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) R7ttd zeros(6)
zeros(6) K3tte zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) R3tte
zeros(6) K7tte zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) R7tte];
%Determinação da derivada da matriz MKR
DMKR= [zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DK3dd DR3dd zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)

```

```

zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DK7dd zeros(6) DR7dd zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DK3de zeros(6) zeros(6) DR3de
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DK7de zeros(6) zeros(6) zeros(6)
DR7de zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DK3td zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) DR3td zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
DK7td zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DR7td zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DK3te zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) DR3te zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DK7te zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DR7te
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) DK3ttt zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
DR3ttt zeros(6) zeros(6) zeros(6) DK7ttt zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) DR7ttt zeros(6) zeros(6) DK3tte zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) DR3tte zeros(6) DK7tte zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6) zeros(6)
zeros(6) zeros(6) zeros(6) DR7tte];
%Determinação da matriz MAC
MAC=[Jc zeros(6,12)
zeros(12,6) Jgdd
zeros(12,6) Jgde
zeros(12,6) Jgtd
zeros(12,6) Jgte
zeros(12,6) Jgttd
zeros(12,6) Jgtte];
%Determinação da derivada da matriz MAC
DMAC=[DJc zeros(6,12)
zeros(12,6) DJgdd
zeros(12,6) DJgde
zeros(12,6) DJgtd
zeros(12,6) DJgte
zeros(12,6) DJgttd
zeros(12,6) DJgtte];

```

```

% Determinação da matriz jacobiana global do veículo e derivada (Jg e DJg)
Jg=MKR*MAC;
DJg=DMKR*MAC+MKR*DMAC;
% Determinação do tensor de inércia de todos os corpos do veículo no referencial inercial
Ti=[Tci zeros(6,12) zeros(6,12)
zeros(6,12) zeros(6,12) zeros(6,12)
zeros(6,12) zeros(12,6) Tddi zeros(12)
zeros(12) zeros(12) zeros(12) zeros(12)
zeros(12,6) zeros(12) Tdei zeros(12) zeros(12) zeros(12) zeros(12)
zeros(12,6) zeros(12) zeros(12) Ttdi zeros(12) zeros(12) zeros(12)
zeros(12,6) zeros(12) zeros(12) zeros(12) Ttei zeros(12) zeros(12)
zeros(12,6) zeros(12) zeros(12) zeros(12) zeros(12) Tttdi zeros(12)
zeros(12,6) zeros(12) zeros(12) zeros(12) zeros(12) zeros(12) Tttei];
% Determinação da matriz de inércia reduzida
M=(Jg.')*Ti*Jg;
% Determinação do vetor reduzido de forças giroscópicas (B)
b=[bc;
bsdd;
bsde;
bstd;
bste;
bsttd;
bstte];
B=(Jg.')*(Ti*DJg*dq+b);
% DINÂMICA LATERAL DO VEÍCULO
% Determinação do ângulo de esterçamento da roda dianteira direita
dstdd4=[-1;
0;
0];
% Vetor unitario da direção longitudinal do pneu, sentido para frente
dstddc=Rodd*A3ddfgh*A1dd*dstdd4;
auxdd=sqrt(dstddc(1)^2+dstddc(2)^2);
deltadd=acos(dstddc(1)/auxdd);
% módulo do ângulo de esterçamento da roda
if (dstddc(2)<0)
deltadd=-deltadd;
% esterçamento para a direita ('toe out'-divergente)
end % se maior que zero, esterçamento para a esquerda ('toe in'-convergente)
% Determinação do ângulo de esterçamento da roda dianteira esquerda

```

```

dstde4=[1;
0;
0];
dstdec=Rode*A3defgh*A1de*dstde4;
auxde=sqrt(dstdec(1)^2+dstdec(2)^2);
deltade=acos(dstdec(1)/auxde);
if (dstdec(2)<0) deltade=-deltade;
end
% Determinação do ângulo de esterçamento da roda intermediaria direita
dsttd4=[-1;
0;
0];
dsttdc=Rotd*A3tdfgh*A1td*dsttd4;
auxtd=sqrt(dsttdc(1)^2+dsttdc(2)^2);
deltatd=acos(dsttdc(1)/auxtd);
if (dsttdc(2)<0)
deltatd=-deltatd;
end
% Determinação do ângulo de esterçamento da roda intermediaria esquerda
dstte4=[1;
0;
0];
% Vetor unitário da direção f da roda no referencial (fgh)4
dsttec=Rote*A3tefgh*A1te*dstte4;
auxte=sqrt(dsttec(1)^2+dsttec(2)^2);
deltate=acos(dsttec(1)/auxte);
if (dsttec(2)<0)
deltate=-deltate;
end
dstttd4=[-1;
0;
0];
dstttdc=Rottd*A3ttdfgh*A1tttd*dstttd4;
auxtttd=sqrt(dstttdc(1)^2+dstttdc(2)^2);
deltattd=acos(dstttdc(1)/auxtttd);
if (dstttdc(2)<0) deltattd=-deltattd;
end
dsttte4=[1;
0;
0];

```



```

0];
% Vetor unitário da direção f da roda no referencial (fgh)4
dstttec=Rotte*A3ttefgh*A1tte*dsttte4;
auxtte=sqrt(dstttec(1)^2+dstttec(2)^2);
deltatte=acos(dstttec(1)/auxtte);
if (dstttec(2)<0)
deltatte=-deltatte;
end
% Determinação dos ângulos de esterçamento dianteiro e traseiro % Determinação dos
ângulos de desvio dos pneus ("slip angles")
% Dianteiro direito
dr7ddi=drci+Ac*dr7ddc+DAc*r7ddc;
% velocidade do pneu dianteiro direito em relação a (XYZ)I
v7ddc=[cos(qd) sin(qd);
-sin(qd) cos(qd)]*[dr7ddi(1);
dr7ddi(2)];
% projeção da velocidade do pneu no referencial do chassis (no plano)
if (abs(v7ddc(1))>0.00001)
angdd=atan2(v7ddc(2),v7ddc(1));
alfadd=angdd-deltadd;
alfadd=alfadd*(180/pi);
else
alfadd=0;
end
% Dianteiro esquerdo
dr7dei=drci+Ac*dr7dec+DAc*r7dec;
% velocidade do pneu dianteiro esquerdo em relação a (XYZ)I
v7dec=[cos(qd) sin(qd);
-sin(qd) cos(qd)]*[dr7dei(1);
dr7dei(2)];
% projeção da velocidade do pneu no referencial do chassis (no plano)
if (abs(v7dec(1))>0.00001)
angde=atan2(v7dec(2),v7dec(1));
alfade=angde-deltade;
alfade=alfade*(180/pi);
else
alfade=0;
end
% Intermediario direito

```

```

dr7tdi=drci+Ac*dr7tdc+DAc*r7tdc;
%velocidade do pneu intermediario direito em relação a (XYZ)I
v7tdc=[cos(qd) sin(qd);
-sin(qd) cos(qd)]*[dr7tdi(1);
dr7tdi(2)];
% projeção da velocidade do pneu no referencial do chassis (no plano)
if (abs(v7tdc(1))>0.00001)
angtd=atan2(v7tdc(2),v7tdc(1));
alfatd=angtd-deltatd;
alfatd=alfatd*(180/pi);
else
alfatd=0;
end
% Intermediario esquerdo
dr7tei=drci+Ac*dr7tec+DAc*r7tec;
%velocidade do pneu intermediario esquerdo em relação a (XYZ)I
v7tec=[cos(qd) sin(qd);
-sin(qd) cos(qd)]*[dr7tei(1);
dr7tei(2)];
% projeção da velocidade do pneu no referencial do chassis (no plano)
if (abs(v7tec(1))>0.00001)
angte=atan2(v7tec(2),v7tec(1));
alfate=angte-deltate;
alfate=alfate*(180/pi);
else
alfate=0;
end
% Traseiro direito
dr7ttdi=drci+Ac*dr7ttdc+DAc*r7ttdc;
%velocidade do pneu traseiro direito em relação a (XYZ)I
v7ttdc=[cos(qd) sin(qd);
-sin(qd) cos(qd)]*[dr7ttdi(1);
dr7ttdi(2)];
% projeção da velocidade do pneu no referencial do chassis (no plano)
if (abs(v7ttdc(1))>0.00001)
angtttd=atan2(v7ttdc(2),v7ttdc(1));
alfattd=angtttd-deltattd;
alfattd=alfattd*(180/pi);
else

```

```

alfattd=0;
end % Traseiro esquerdo
dr7ttei=drci+Ac*dr7ttec+DAc*r7ttec;
% velocidade do pneu traseiro esquerdo em relação a (XYZ)I
v7ttec=[cos(qd) sin(qd);
-sin(qd) cos(qd)]*[dr7ttei(1);
dr7ttei(2)];
% projeção da velocidade do pneu no referencial do chassis (no plano)
if (abs(v7ttec(1))>0.00001)
angtte=atan2(v7ttec(2),v7ttec(1));
alfatte=angtte-deltatte;
alfatte=alfatte*(180/pi);
else
alfatte=0;
end
% Determinação das forças laterais dos pneus ("Fórmula Mágica")
% Dianteira direita
if (fvpdd<=0)
flatdd=0;
else
flatdd=fvpdd*CC_alfa*alfadd;
end
% Dianteira esquerda
if (fvpde<=0)
flatde=0;
else
flatde=fvpde*CC_alfa*alfade;
end
% Intermediario direito
if (fvptd<=0)
flattd=0;
else
flattd=fvptd*CC_alfa*alfatd;
end
% Intermediario esquerdo
if (fvpte<=0)
flatte=0;
else
flatte=fvpte*CC_alfa*alfate;

```

```

end
% Traseiro direito
if (fvpttd<=0)
flatttd=0;
else
flatttd=fvpttd*CC_alfa*alfattd;
end
% Traseiro esquerdo
if (fvptte<=0)
flattte=0;
else
flattte=fvptte*CC_alfa*alfatte;
end
%Determinação do vetor de forças aplicadas reduzido do sistema
Acpl=[cos(qd) -sin(qd);
sin(qd) cos(qd)];
% CHASSIS
pci=[0;
0;
-mc*g];
% peso no referencial inercial
fsddc3=[0;
0;
fmdd+fadd];
% forças da suspensão DD no referencial (fgh)3
fsddci=Ac*Rodd*A3ddfgh*fsddc3;
% forças da suspensão DD no referencial inercial
rapddi=Ac*rapddc;
rapdditil=[0 -rapddi(3,1) rapddi(2,1);
rapddi(3,1) 0 -rapddi(1,1);
-rapddi(2,1) rapddi(1,1) 0];
msddci=rapdditil*fsddci;
% momento da suspensão DD no referencial inercial
fsdec3=[0;
0;
fmde+fade];
% forças da suspensão DE no referencial (fgh)3
fsdeci=Ac*Rode*A3defgh*fsdec3;
% forças da suspensão DE no referencial inercial

```

```

rapdei=Ac*rapdec;
rapdeitil=[0 -rapdei(3,1) rapdei(2,1);
rapdei(3,1) 0 -rapdei(1,1);
-rapdei(2,1) rapdei(1,1) 0];
msdeci=rapdeitil*fsdeci;
% momento da suspensão DE no referencial inercial
fstdc3=[0;
0;
fimt+fatd];
% forças da suspensão TD no referencial (fgh)3
fstdci=Ac*Rotd*A3tdfgh*fstdc3;
% forças da suspensão TD no referencial inercial
raptdi=Ac*raptdc;
raptditil=[0 -raptdi(3,1) raptdi(2,1);
raptdi(3,1) 0 -raptdi(1,1);
-raptdi(2,1) raptdi(1,1) 0];
mstdci=raptditil*fstdci;
% momento da suspensão TD no referencial inercial
fstec3=[0;
0;
fmte+fate];
% forças da suspensão TE no referencial (fgh)3
fsteci=Ac*Rote*A3tefgh*fstec3;
% forças da suspensão TE no referencial inercial
raptei=Ac*raptec;
rapteitil=[0 -raptei(3,1) raptei(2,1);
raptei(3,1) 0 -raptei(1,1);
-raptei(2,1) raptei(1,1) 0];
msteci=rapteitil*fsteci;
% momento da suspensão TE no referencial inercial
fsttdc3=[0;
0;
fimt+fatd];
% forças da suspensão ttd no referencial (fgh)3
fsttdci=Ac*Rottd*A3ttdfgh*fsttdc3;
% forças da suspensão ttd no referencial inercial
raptttdi=Ac*raptttdc;
raptttditil=[0 -raptttdi(3,1) raptttdi(2,1);
raptttdi(3,1) 0 -raptttdi(1,1);
-raptttdi(2,1) raptttdi(1,1) 0];
msttdci=raptttditil*fsttdci;
% momento da suspensão ttd no referencial inercial
fsttec3=[0;

```

```

0;
fmtte+fatte];
% forças da suspensão tte no referencial (fgh)3
fstteci=Ac*Rotte*A3ttefgh*fsttec3;
% forças da suspensão tte no referencial inercial rapttei=Ac*rapttec;
raptteitil=[0 -rapttei(3,1) rapttei(2,1);
rapttei(3,1) 0 -rapttei(1,1);
-rapttei(2,1) rapttei(1,1) 0];
mstteci=raptteitil*fstteci;
% momento da suspensão tte no referencial inercial
wce=[pci+fsddci+fsdeci+fstdci+fsteci+fstdci+fstteci;
msddci+msdeci+mstdci+msteci+mstdci+mstteci];
% SUSPENSÃO DIANTEIRA DIREITA
% Determinação do vetor de forças externas
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
p3ddi=[0;
0;
-m3dd*g];
% peso no referencial inercial
fsdd33=[0;
0;
-(fmdd+fadd)];
% forças da suspensão no referencial (fgh)3
fsdd3i=Ac*Rodd*A3ddfgh*fsdd33;
% forças da suspensão no referencial inercial
w3dde=[p3ddi+fsdd3i;
zeros(3,1)];
% Corpo 7 (roda + pneu)
p7ddi=[0;
0;
-m7dd*g];
% peso no referencial inercial
fp7totddc=[0;
-flatdd*cos(deltadd)];
fp7totddi=Acpl*fp7totddc;
fp7ddi=[fp7totddi(1);
fp7totddi(2);
fvpdd];
mp7dd=[0;

```

```

0;
0];
% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial (fgh)4
mp7ddi=Ac*A7ddc*mp7dd;
% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial inercial
w7dde=[p7ddi+fp7ddi;
mp7ddi];
wdde=[w3dde;
w7dde];
% SUSPENSÃO DIANTEIRA ESQUERDA
% Determinação do vetor de forças externas
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
p3dei=[0;
0;
-m3de*g];
% peso no referencial inercial
fsde33=[0;
0;
-(fmde+fade)];
% forças da suspensão no referencial (fgh)3
fsde3i=Ac*Rode*A3defgh*fsde33;
% forças da suspensão no referencial inercial
w3dee=[p3dei+fsde3i;
zeros(3,1)];
% Corpo 7 (roda + pneu) p7dei=[0;
0;
-m7de*g];
% peso no referencial inercial fp7totdec=[0;
-flatde*cos(deltade)];
fp7totdei=Acpl*fp7totdec;
fp7dei=[fp7totdei(1);
fp7totdei(2);
fvpde];
mp7de=[0;
0;
0];
% momento resistivo devido à força
longitudinal e torque na roda no referencial (fgh)4
mp7dei=Ac*A7dec*mp7de;

```

```

% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial inercial
w7dee=[p7dei+fp7dei;
mp7dei];
wdee=[w3dee;
w7dee];
% SUSPENSÃO INTERMEDIARIA DIREITA
% determinação do vetor de forças externas
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
p3tdi=[0;
0;
-m3td*g];
% peso no referencial inercial
fstd33=[0;
0;
-(fmtd+fatd)];
% forças da suspensão no referencial (fgh)3
fstd3i=Ac*Rotd*A3tdfgh*fstd33;
% forças da suspensão no referencial inercial
w3tde=[p3tdi+fstd3i;
zeros(3,1)];
% Corpo 7 (roda + pneu)
p7tdi=[0;
0;
-m7td*g];
% peso no referencial inercial
fp7tottdc=[0;
-flattd*cos(deltatd)];
fp7tottdi=Acpl*fp7tottdc;
fp7tdi=[fp7tottdi(1);
fp7tottdi(2);
fvptd];
mp7td=[0;
0;
0];
% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial (fgh)4
mp7tdi=Ac*A7tdc*mp7td;
% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial inercial
w7tde=[p7tdi+fp7tdi;
mp7tdi];

```



```

wtde=[w3tde;
w7tde];
% SUSPENSÃO INTERMEDIARIA ESQUERDA
% determinação do vetor de forças externas
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
p3tei=[0;
0;
-m3te*g];
% peso no referencial inercial
fste33=[0;
0;
-(fmte+fate)];
% forças da suspensão no referencial (fgh)3
fste3i=Ac*Rote*A3tefgh*fste33;
% forças da suspensão no referencial inercial
w3tee=[p3tei+fste3i;
zeros(3,1)];
% Corpo 7 (roda + pneu)
p7tei=[0;
0;
-m7te*g];
% peso no referencial inercial
fp7tottec=[0;
-flatte*cos(deltate)];
fp7tottei=Acpl*fp7tottec;
fp7tei=[fp7tottei(1);
fp7tottei(2);
fvpte];
mp7te=[0;
0;
0];
% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial (fgh)4
mp7tei=Ac*A7tec*mp7te;
% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial inercial
w7tee=[p7tei+fp7tei;
mp7tei];
wtee=[w3tee;
w7tee];
% SUSPENSÃO TRASEIRA DIREITA

```

```

% determinação do vetor de forças extternas
% Corpo 3 (manga do eixo + telescópico inferior)
p3tttdi=[0;
0;
-m3tttd*g];
% peso no referencial inercial fsttd33=[0;
0;
-(fnttd+fattd)];
% forças da suspensão no referencial (fgh)3
fsttd3i=Ac*Rotttd*A3ttdfgh*fsttd33;
% forças da suspensão no referencial inercial
w3ttde=[p3tttdi+fsttd3i;
zeros(3,1)];
% Corpo 7 (roda + pneu)
p7tttdi=[0;
0;
-m7tttd*g];
% peso no referencial inercial
fp7tottttdc=[0;
-flatttd*cos(deltattd)];
fp7tottttdi=Acpl*fp7tottttdc;
fp7tttdi=[fp7tottttdi(1);
fp7tottttdi(2);
fvpttd];
mp7tttd=[0;
0;
0];
% momento resistivo devido à força longitudinal e torue na roda no referencial (fgh)4
mp7tttdi=Ac*A7tttdc*mp7tttd;
% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial inercial
w7ttde=[p7tttdi+fp7tttdi;
mp7tttdi];=[w3ttde;
w7ttde];
% SUSPENSÃO TRASEIRA ESQUERDA
% determinação do vetor de forças externas
% Corpo 3 (manga do eixo + ttelescópico inferior)
p3ttei=[0;
0;
-m3tte*g];

```

```

% peso no referencial inercial
fstte33=[0;
0;
-(fntte+fatte)];
% forças da suspensão no referencial (fgh)3 fstte3i=Ac*Rotte*A3ttefgh*fstte33;
% forças da suspensão no referencial inercial
w3ttee=[p3ttei+fstte3i;
zeros(3,1)];
% Corpo 7 (roda + pneu)
p7ttei=[0;
0;
-m7tte*g];
% peso no referencial inercial fp7totttec=[0;
-flattte*cos(deltatte)];
fp7totttei=Acpl*fp7totttec;
fp7ttei=[fp7totttei(1);
fp7totttei(2);
fvptte];
mp7tte=[0;
0;
0];
% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial (fgh)4
mp7tte=Ac*A7ttec*mp7tte;
% momento resistivo devido à força longitudinal e torque na roda no referencial inercial
w7ttee=[p7ttei+fp7ttei;
mp7ttei];=[w3ttee;
w7ttee];
% Vetor de forças externas we=[wce;
wdde;
wdee;
wtde;
wtee;
wttde;
wttee];
% Vetor de forças externas reduzido
Q=(Jg.?)*we;
% Sistema de equações diferenciais a ser resolvido
A1=[zeros(18) eye(18);
zeros(18) zeros(18)];

```

```
A2=[zeros(18,1);
(inv(M))*(Q-B)];
yp=A1*y+A2;
if(iter>=2)
if timeplot(iter)<= timeplot(iter-1)
iter=iter-1;
end
end
timeplot(iter)=t;
b1plotdd(iter)=b1;
b2plotdd(iter)=b2;
b3plotdd(iter)=b3;
b4plotdd(iter)=b4;
b5plotdd(iter)=b5;
b9plotdd(iter)=b9;
b10plotdd(iter)=b10;
defdd(iter)=dmdd;
fvertdd(iter)=fvpdd;
camberdd(iter)=gamadd;
b1plotde(iter)=b11;
b2plotde(iter)=b12;
b3plotde(iter)=b13;
b4plotde(iter)=b14;
b5plotde(iter)=b15;
b9plotde(iter)=b19;
b10plotde(iter)=b20;
defde(iter)=dmde;
fvertde(iter)=fvpde;
camberde(iter)=gamade;
b1plottd(iter)=b21;
b2plottd(iter)=b22;
b3plottd(iter)=b23;
b4plottd(iter)=b24;
b5plottd(iter)=b25;
b9plottd(iter)=b29;
b10plottd(iter)=b30;
deftd(iter)=dmttd;
fverttd(iter)=fvptd;
cambertd(iter)=gamatd;
```

```
b1plotte(iter)=b31;
b2plotte(iter)=b32;
b3plotte(iter)=b33;
b4plotte(iter)=b34;
b5plotte(iter)=b35;
b9plotte(iter)=b39;
b10plotte(iter)=b40;
defte(iter)=dmte;
fvertte(iter)=fvpte;
camberte(iter)=gamate;
b1plotttd(iter)=b41;
b2plotttd(iter)=b42;
b3plotttd(iter)=b43;
b4plotttd(iter)=b44;
b5plotttd(iter)=b45;
b9plotttd(iter)=b49;
b10plotttd(iter)=b50;
defttd(iter)=dmtd;
fverttd(iter)=fvpttd;
camberttd(iter)=gamattd;
b1plottte(iter)=b51;
b2plottte(iter)=b52;
b3plottte(iter)=b53;
b4plottte(iter)=b54;
b5plottte(iter)=b55;
b9plottte(iter)=b59;
b10plottte(iter)=b60;
deftte(iter)=dmtte;
fverttte(iter)=fvptte;
cambertte(iter)=gamatte;
deltaddvet(iter)=deltadd;
convde(iter)=180/pi*(deltade-deltadd);
deltadevet(iter)=deltade;
deltatdvet(iter)=deltatd;
convte(iter)=180/pi*(deltate-deltatd);
deltatevet(iter)=deltate;
deltattdvet(iter)=deltattd;
convtte(iter)=180/pi*(deltatte-deltattd);
deltattevet(iter)=deltatte;
```

```
flatplot(iter)=flatdd;
flatplot2(iter)=flatde;
flatplot3(iter)=flattd;
flatplot4(iter)=flatte;
flatplot5(iter)=flattdt;
flatplot6(iter)=flattte;
yaccelplot(iter)=yp(20);
vetqvol(iter)=qvol;
xpddi(iter)=rpddi(1);
ypddi(iter)=rpddi(2);
xpdei(iter)=rpdei(1);
ypdei(iter)=rpdei(2);
xptdi(iter)=rptdi(1);
yptdi(iter)=rptdi(2);
xptei(iter)=rptei(1);
yptei(iter)=rptei(2);
xpttdi(iter)=rpttdi(1);
ypttdi(iter)=rpttdi(2);
xpttei(iter)=rpttei(1);
ypttei(iter)=rpttei(2);
end
```