



**Michael Cordeiro Carvalho Merling**

**Uma abordagem gerencial para o procedimento de  
projeto de suspensões de veículos terrestres**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Mauro Speranza Neto

Rio de Janeiro

Setembro de 2007



**Michael Cordeiro Carvalho Merling**

**Uma Abordagem Gerencial para o  
Procedimento de Projeto de Suspensões  
de Veículos Terrestres**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Mauro Speranza Neto**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Paulo Roberto Rocha Aguiar**

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento-  
Centro Tecnológico do Exército

**Prof. Fernando Ribeiro da Silva**

Instituto Militar de Engenharia

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de setembro de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador

### **Michael Cordeiro Carvalho Merling**

Graduou-se em Engenharia Mecânica no IME (Instituto Militar de Engenharia) em 2001. Trabalhou para o Exército Brasileiro no projeto da Viatura Leve de Emprego Geral Aerotransportada. Atualmente é Engenheiro de Equipamentos Pleno da Petrobras.

#### Ficha Catalográfica

Merling, Michael Cordeiro Carvalho

Uma abordagem gerencial para o procedimento de projeto de suspensões de veículos terrestres / Michael Cordeiro Carvalho Merling ; orientador: Mauro Speranza Neto. – 2007.

174 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Dinâmica veicular. 3. Gerência de projeto de suspensões. 4. Integração de sistemas. I. Speranza Neto, Mauro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Dedico este trabalho a meus familiares e amigos e em especial à minha mãe por todo seu amparo e à minha namorada pela sua compreensão.

## Agradecimentos

A meus pais, por terem estabelecido como um dos pilares da minha educação a constante e eterna necessidade da busca do conhecimento. À minha mãe, pelo apoio moral e incentivo, sempre necessários para a conquista dos nossos objetivos.

A meu orientador, Dr. Mauro Speranza Neto, pelas orientações precisas, pela confiança e pela amizade.

A meus ex-chefes Exmo. Srs. Gen Bda Andrade, Gen Bda Cristino e Gen Bda Kümmel e Maj Arthur Rozendo de Campos Leite por terem viabilizado a minha matrícula no Mestrado.

A todos aqueles que de algum modo contribuíram para o êxito deste trabalho.

E, finalmente, a Deus, por ter estado sempre ao meu lado ao longo do curso.

## Resumo

Merling, Michael Cordeiro Carvalho; Neto, Mauro Speranza. **Uma abordagem gerencial para o procedimento de projeto de suspensões de veículos terrestres**. Rio de Janeiro, 2007. 174p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Apresenta-se uma visão gerencial para o procedimento de projeto de suspensões de veículos terrestres. São descritos, em linhas gerais, os principais aspectos técnicos relativos ao projeto deste sub-sistema veicular, e tratados, com detalhes, os tópicos fundamentais para a sua administração. Discute-se, entre outras, as etapas de especificação do projeto, quesitos necessários, normas a serem aplicadas, e as etapas a cumprir, segundo a visão do gerente administrativo do projeto, responsável pela organização do grupo de técnicos que irá desenvolvê-lo.

## Palavras-chave

Dinâmica veicular; gerência de projeto de suspensões; integração de sistemas veiculares

## **Abstract**

Merling, Michael Cordeiro Carvalho; Neto, Mauro Speranza. **A managerial approach to the ground vehicles suspension design procedure**. Rio de Janeiro, 2007. 174p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

It is shown a managerial vision of the ground vehicles suspension design procedure. Are described, in general lines, the main technical aspects related to the design of this vehicular sub-system, and treats, with details, the fundamental topics for its administration. It is discussed, beside others, the design specification stages, necessary requirements, norms to be applied, and the stages to accomplish, according to the vision of the administrative design manager, responsible for the organization of the technicians' group that will develop it.

## **Keywords**

Vehicular Dynamics; Vehicular Systems Integration; Suspension Design Management.

# Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO   | 20 |
| 1.1. Origem da suspensão automotiva                               | 22 |
| 1.2. Projeto de suspensão   | 23 |
| 1.3. Revisão bibliográfica  | 25 |
| 1.4. Relevância e contribuição deste trabalho                     | 27 |
| 1.5. Organização do trabalho                                      | 27 |
| <br>  |    |
| 2. PROJETO CONCEITUAL   | 29 |
| 2.1. Informações gerenciais                                       | 29 |
| 2.1.1. Atribuições gerenciais                                     | 29 |
| 2.1.2. Identificação da necessidade – Demanda por um novo projeto | 33 |
| 2.1.3. Definição da aplicação geral                               | 36 |
| 2.1.4. Requisitos de projeto                                      | 39 |
| 2.1.5. Estudo de viabilidade técnica e econômica – EVTE           | 41 |
| 2.2. Tipos de suspensão   | 42 |
| 2.2.1. Suspensão por eixo rígido                                  | 44 |
| 2.2.1.1 Suspensão tipo Hotchkiss                                  | 44 |
| 2.2.1.2 Suspensão tipo Four Link                                  | 45 |
| 2.2.1.3 Suspensão tipo De Dion                                    | 46 |
| 2.2.2. Suspensão independente                                     | 47 |
| 2.2.2.1 Suspensão MacPherson                                      | 47 |
| 2.2.2.2 Semi-eixo flutuante                                       | 48 |
| 2.2.2.3 Triângulo traseiro  | 49 |
| 2.2.2.4 Bandeja dupla paralela ou Trapésio articulado             | 50 |
| 2.2.2.5 Bandeja dupla com braços não-paralelos                    | 52 |
| 2.2.3. Escolha do tipo  | 53 |
| 2.3. Escolha de rodas e de pneus                                  | 55 |
| <br>  |    |
| 3. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA   | 61 |
| 3.1. Distância do solo  | 63 |



|  |     |
|--|-----|
| 3.2. Ângulos Característicos                                   | 64  |
| 3.2.1. Câamber   | 65  |
| 3.2.2. Cáster  | 68  |
| 3.2.3. Inclinação do pino mestre                               | 70  |
| 3.2.4. Scrub Radius  | 71  |
| 3.2.5. Ângulo incluso – Included angle                         | 72  |
| 3.2.6. Convergência  | 73  |
| 3.2.7. Set back  | 75  |
| 3.2.8. Anti-dive   | 75  |
| 3.2.9. Anti-squat  | 77  |
| 3.2.10. Bump steer   | 77  |
| 3.2.11. Alinhamento do eixo                                    | 78  |
| 3.3. Centro de Rolagem – Roll centre                           | 78  |
| 3.4. Modelo Computacional - ferramenta CAD                     | 83  |
| <br>   |     |
| 4. ANÁLISE ESTÁTICA  | 92  |
| 4.1. Distribuição de peso                                      | 92  |
| 4.2. Posição e inclinação da mola e do amortecedor             | 97  |
| 4.3. Dimensionamento estático da mola                          | 99  |
| <br>   |     |
| 5. ANÁLISES CINEMÁTICA E DINÂMICA                              | 103 |
| 5.1. Movimentos do Mecanismo                                   | 104 |
| 5.1.1. Geometria Anti-dive, anti-squat, anti-lift e anti-pitch | 104 |
| 5.1.2. Variações nos Ângulos Característicos                   | 110 |
| 5.2. Dinâmica  | 115 |
| 5.2.1. Freqüências e modos naturais                            | 116 |
| 5.2.2. Coeficientes de amortecimento                           | 117 |
| 5.2.3. Dinâmica longitudinal                                   | 120 |
| 5.2.4. Dinâmica transversal                                    | 123 |
| 5.2.5. Dinâmica vertical                                       | 125 |
| <br>   |     |
| 6. ANÁLISE DIMENSIONAL   | 127 |
| 6.1. Definição dos carregamentos                               | 131 |
| 6.2. Determinação dos esforços                                 | 132 |
| 6.3. Análise computacional através de elementos finitos para   | 133 |

|   |     |
|---|-----|
| determinação de tensões e deformações             |     |
| 6.4. Escolha dos Materiais                        | 135 |
| 6.5. Especificação de Componentes                 | 136 |
| 6.6. Desenhos para Construção                     | 137 |
| <br>  |     |
| 7. PROTÓTIPO FUNCIONAL                            | 138 |
| 7.1. Escolha da escala e do material              | 139 |
| 7.2. Prototipagem rápida                          | 140 |
| 7.3. Descrição das Etapas de prototipagem         | 145 |
| <br>  |     |
| 8. ANÁLISE EXPERIMENTAL                           | 147 |
| 8.1. Testes Estáticos                             | 147 |
| 8.2. Testes Dinâmicos                             | 148 |
| 8.3. Sistema de Instrumentação                    | 152 |
| <br>  |     |
| 9. TRABALHOS FUTUROS                              | 155 |
| <br>  |     |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS                        | 156 |
| <br>  |     |
| Anexo 1 – Requisitos Técnicos Básicos             | 162 |
| Anexo 2 – Anteprojeto                             | 169 |
| Anexo 3 – Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica | 173 |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.01 – Ciclo de vida de um projeto de construção   | 21 |
| Figura 2.01 – Organização funcional - caixas pretas representam as pessoas relacionadas às atividades do projeto.                 | 30 |
| Figura 2.02 – Organização por projetos.   | 31 |
| Figura 2.03 – Organização matricial forte.  | 31 |
| Figura 2.04 – Fluxo de iniciação de um novo projeto   | 32 |
| Figura 2.05 – Modelo de suspensão para uso no asfalto, com eixo rígido na traseira.   | 38 |
| Figura 2.06 – Comparação entre as suspensões passiva, semi-ativa e ativa.   | 43 |
| Figura 2.07 – Sistema Hotchkiss.  | 45 |
| Figura 2.08 – Sistema Four Link.  | 46 |
| Figura 2.09 – Sistema De Dion.  | 47 |
| Figura 2.10 – Sistema MacPherson. Muito usado nos veículos de fabricação em série.  | 48 |
| Figura 2.11 – Sistema de semi-eixo flutuante. A utilização de cardans reduz a inclinação lateral das rodas (cambagem) nas curvas. | 49 |
| Figura 2.12 – Sistemas de triângulo traseiro perpendicular e em diagonal.   | 50 |
| Figura 2.13 – Suspensões por braços paralelos de comprimentos distintos.  | 51 |
| Figura 2.14 – Distribuição de forças em uma suspensão por bandeja dupla paralela.   | 51 |
| Figura 2.15 – Sistema de bandeja dupla em situação não desejável de câster positivo.  | 52 |
| Figura 2.16 – Sistema de Bandeja Dupla usado no Maserati Spyder.  | 52 |
| Figura 2.17 – Foto de um carro de Fórmula 1.  | 54 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.18 – Nomenclatura e marcações de pneu no sistema métrico.  | 58 |
| Figura 3.01 – Conjunto de mola e amortecedor axissimétricos e de percursos idênticos.   | 62 |
| Figura 3.02 – Conjunto de mola e amortecedor separados e com percursos distintos. Usado na suspensão dianteira da Rural Luxo.   | 62 |
| Figura 3.03 – Distância ao solo identificada em um eixo rígido.   | 63 |
| Figura 3.04 – Ângulo de câmber  | 65 |
| Figura 3.05 – Ângulo de câmber  | 66 |
| Figura 3.06 – Desgaste prematuro do pneu pelo câmber excessivo  | 67 |
| Figura 3.07 – Câmber observado na posição estática e comparado ao obtido com o movimento da suspensão para cima.  | 67 |
| Figura 3.08 – Cáster  | 68 |
| Figura 3.09 – Ângulo de Inclinação do Pino Mestre.  | 70 |
| Figura 3.10 – Scrub Radius  | 71 |
| Figura 3.11 – Identificação do ângulo incluído  | 73 |
| Figura 3.12 – Convergência  | 74 |
| Figura 3.13 – SET BACK  | 75 |
| Figura 3.14 – Mergulho dianteiro ocasionado pela frenagem.  | 76 |
| Figura 3.15 – Alinhamento do eixo traseiro.   | 78 |
| Figura 3.16 – Centro de rolamento e swing arm length (SAL).   | 82 |
| Figura 3.17 – Desenhos conceituais do veículo.  | 84 |
| Figura 3.18 - Figura feita em 3D mostrada em topo.  | 85 |
| Figura 3.19 - Figura feita em 3D mostradas vistas lateral e frontal.  | 85 |
| Figura 3.20 - Vista frontal da distância ao solo.   | 86 |
| Figura 3.21 - Vista lateral do conjunto de força com a tripulação e a verificação do atendimento de alguns requisitos (ângulo de entrada e ângulo de saída), mostrando ainda o ângulo central e a distância entre-eixo. | 87 |
| Figura 3.22 - Vista de topo do conjunto de força com a posição dos bancos.  | 87 |
| Figura 3.23 - Vista frontal com os pontos de apoio das bandejas da suspensão no chassi e os pontos de rotação da manga de eixo,   | 88 |

|  |     |
|--|-----|
| próxima à roda.  |     |
| Figura 3.24 – Vista frontal, sendo mostrados alguns ângulos característicos, o centro de rolamento e o braço de rolagem. O ângulo incluso no caso da figura ocorre para câmber igual a zero. | 89  |
| Figura 3.25 – Vista frontal, sendo mostrados os limites de curso da suspensão em análise 2D.   | 90  |
| Figura 3.26 – Localização das linhas de referência que ligam os componentes de suspensão.  | 91  |
| Figura 4.01 - Sistema de coordenadas segundo as normas.  | 93  |
| Figura 4.02 - Aplicações de carga ao veículo para dimensionamento das molas  | 96  |
| Figura 4.03 – Possibilidades de posicionamento da mola para diversos tipos de suspensão.   | 98  |
| Figura 4.04: Inclinação da mola de um ângulo teta ( $\theta$ ).  | 99  |
| Figura 4.05 - Tipos de acabamento das molas helicoidais de compressão.   | 101 |
| Figura 4.06 - aplicações de forças para os tipos de acabamento existentes.   | 101 |
| Figura 5.01 – Vista lateral da suspensão com dois braços de controle e com o trailing-arm equivalente.   | 105 |
| Figura 5.02 – Vista lateral da suspensão com dois braços de controle e com o trailing-arm equivalente.   | 105 |
| Figura 5.03 – Análise cinemática do eixo traseiro tipo semi-trailing do Opel Omega (1996).   | 111 |
| Figura 5.04 – Propriedade cinemática da suspensão traseira de um Audi A6 (1996).   | 112 |
| Figura 5.05: Geometria de Ackermann.   | 113 |
| Figura 5.06: Sistema de direção prevendo a geometria de ackermann.   | 113 |
| Figura 5.07 – Ângulo de esterçamento de dois veículos de mercado e seus desvios em relação ao ângulo de ackermann.   | 114 |
| Figura 5.08 – Raio mínimo externo de uma curva, descrita por um veículo com o máximo de esterçamento.  | 115 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.09 – Seqüência de implementação do estudo da dinâmica da suspensão segundo Staniforth.   | 119 |
| Figura 5.10 – Gráfico para a obtenção da altura do centro de rolagem (CR) de um sistema de bandeja dupla.   | 121 |
| FIG. 5.11 – Trajetória dos centros de massas do chassis, roda dianteira direita, roda dianteira esquerda, roda traseira direita e roda traseira esquerda no plano (XY).   | 122 |
| FIG. 5.12 – Esterçamento em degrau.   | 122 |
| FIG. 5.13 – Força vertical dos pneus no solo x tempo para manobra evasiva dupla a uma velocidade de 80 km   | 123 |
| Figura 5.14 – Cáster permanece inalterado durante a movimentação da suspensão.  | 123 |
| Figura 5.15 – Cáster é alterado durante a movimentação da suspensão pela existência de geometria anti-dive.   | 124 |
| Figura 5.16 – No caso da mola estar suportada pela bandeja inferior, a força $FG_z$ é a que suporta a massa suspensa e o momento causado pelas forças $FZ_w$ e $FG_z$ gera as forças de reação $FG_x$ e $FE_x$ na direção paralela ao suporte da bandeja ao chassis | 124 |
| Figura 5.17 – Forças envolvidas na descida e subida da direção  | 126 |
| Figura 6.01 – Redução de peso de componentes em concepção pela remoção de material nas áreas de menor solicitação.  | 128 |
| Figura 6.02 – Fases do dimensionamento de um novo componente.   | 129 |
| Figura 6.03 – Depressão na pista.   | 130 |
| Figura 6.04 – Carregamentos no sistema de suspensão   | 132 |
| Figura 6.05 – Tratamento em MEF do braço de suspensão dianteira de um caminhão.   | 135 |
| Figura 6.06 – Desenho de fabricação de uma bandeja inferior de suspensão. Como a peça deste desenho é soldada e não forjada, outras cotas devem ser mostradas em outros desenhos relativos a cada item deste componente.  | 137 |
| Figura 7.01 – Interface Haptic.   | 141 |
| Figura 7.02 – Impressoras FDM   | 143 |
| Figura 7.03 – Componentes criados por impressoras FDM   | 143 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 7.04 – Processo de modelagem por deposição de material fundido. | 144 |
| Figura 7.05 – Base utilizada na estereolitografia.                     | 145 |
| Figura 8.01 – Detector de folgas na suspensão.                         | 148 |
| Figura 8.02 - Resultados obtidos por um dinamômetro de chassis.        | 149 |
| Figura 8.03: Sistema modular de inspeção técnica de veículos.          | 149 |
| Figura 8.04 – Teste em pista.  | 150 |
| Figura 8.05 – Rampa lateral em mesa angular.                           | 151 |
| Figura 8.06 - Teste de durabilidade com a utilização de atuadores.     | 151 |
| Figura 8.07 – Equipamentos de instrumentação existentes no mercado.    | 153 |

## Lista de tabelas

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 2.01: Métodos de identificação da necessidade de um novo projeto.                           | 34  |
| Tabela 2.02 – Definições de tipos de veículos  | 39  |
| Tabela 2.03 – Índices de Carga utilizados em pneu  | 59  |
| Tabela 2.04 – Índices de velocidade utilizados em pneu   | 59  |
| Tabela 3.01 – Determinação dos Centros de Rolamento para diversos tipos de suspensão.              | 79  |
| Tabela 4.01: Relação de componentes  | 94  |
| Tabela 4.02 – Valores de referência.   | 94  |
| Tabela 5.01 – Anti-dive.   | 107 |
| Tabela 5.02 – Anti-squat.  | 107 |
| Tabela 5.03 – Anti-lift na frenagem.   | 108 |
| Tabela 5.04 – Anti-lift na aceleração.   | 108 |
| Tabela 5.05 – Anti-pitch.  | 109 |
| Tabela 5.06 – Anti-dive e anti-lift.   | 110 |
| Tabela 5.07 – Reações de translação e rotação da massa suspensa do veículo de acordo com os eixos. | 116 |
| Tabela 5.08 – Frequências de utilização segundo Riley 2003.  | 117 |



## Lista de siglas

2D – segunda dimensão ou duas dimensões

3D – terceira dimensão ou três dimensões

4WD - “Four Wheel Drive” - tração nas quatro rodas

4WS - “Four Wheel Steering” – esterçamento nas quatro rodas

ABS - “Anti-lock Brake System”

ASME - “American Society of Mechanical Engineers”

CAD – “Computer Aided Design”

CG – Centro de gravidade

CMT – Capacidade máxima de tração

CPM – ciclos por minuto

CR – Centro de rolagem

CTB – Código de trânsito brasileiro (Ver Bibliografia)

CVT – “Continuously variable transmission” - transmissão continuamente variável

EVTE – Estudo de viabilidade técnico-econômica

FDM™ - “Fused Deposition Modeling”

FEM – “Finite Element Method” = MEF

GVW – “Gross vehicle weight”

ISO – “International Organization for Standardization”

MEF - Método de Elementos Finitos

NHTSA – “National Highway Traffic Safety Administration”

PBCT – Peso bruto total combinado

PBT – Peso bruto total

PBT – Peso bruto total

PMBOK – “Project Management Body of Knowledge”

QFD – “Quality for Function Design”

SAE - “Society of Automotive Engineers”

SAL – “Swing Axle Length”

SL – “Suspension leverage”

SLA – Estereolitografia (SL)

SLS – Sinterização Seletiva à Laser

SUV – “Sport Utility Vehicle”

*Nossa maior fraqueza está em  
desistir. O caminho mais certo de  
vencer é tentar mais uma vez.*

Thomas Edison