



**Fábio Vinícius Moura de Carvalho**

**Modelos de Veículos Flexíveis para Análise e Simulação de  
Colisões e Reconstituição de Acidentes**

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0210213/CB

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Mauro Speranza Neto, D.Sc.

Rio de Janeiro, fevereiro de 2004



**Fábio Vinícius Moura de Carvalho**

## **Modelos de Veículos Flexíveis para Análise e Simulação de Colisões e Reconstituição de Acidentes**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Mauro Speranza Neto, D.Sc.**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica -PUC-Rio

**Prof. Carlos Alberto de Almeida, Ph.D.**

Departamento de Engenharia Mecânica -PUC-Rio

**Prof. Fernando Ribeiro da Silva, D.Sc.**

Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais - IME

**Prof. Francisco José da Cunha Pires Soeiro, Ph.D.**

Departamento de Engenharia Mecânica -UERJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de fevereiro de 2004

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

### **Fábio Vinícius Moura de Carvalho**

Graduou-se em Engenharia Mecânica e de Armamento (Instituto Militar de Engenharia –IME) em 1998. Professor de Desenho técnico e Autocad pelo Departamento de Engenharia Elétrica da UNESA.

#### Ficha Catalográfica

Carvalho, Fábio Vinícius Moura de

Modelos de veículos flexíveis para análise e simulação de colisões e reconstituição de acidentes / Fábio Vinícius Moura de Carvalho ; orientador: Mauro Speranza Neto. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

135 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Dinâmica de veículos. 3. Veículos terrestres flexíveis. 4. Análise e simulação de colisões. 5. Reconstituição de acidentes. 6. Engenharia forense. I. Speranza Neto, Mauro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

À minha esposa pelo apoio, confiança e paciência.

## Agradecimentos

Ao meu orientador Mauro Speranza Neto pelo apoio, compreensão, amizade e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho;

À PUC-Rio pelo apoio institucional;

Aos funcionários do DEM pela amizade e apoio recebido;

À minha família e amigos, que de alguma forma, contribuíram com este trabalho.

## Resumo

Carvalho, Fábio V.. **Modelos de Veículos Flexíveis para Análise e Simulação de Colisões e Reconstituição de Acidentes**. Rio de Janeiro, 2004. xxxp. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

É apresentado um procedimento para simulação de colisões de veículos terrestres deformáveis, cuja entrada são as condições imediatamente anteriores ao choque, produzindo como saída a evolução das variáveis ao longo do tempo de duração do impacto. Foram feitas simulações de casos semelhantes aos apresentados na literatura, e os resultados obtidos validaram os modelos criados. O procedimento foi implementado em Simulink/MatLab, seguindo a mesma estrutura dos demais programas em desenvolvimento nesta linha de pesquisa, de modo a futuramente integrá-lo aos pré-processadores e pós-processadores gráficos do programa SVDV - Simulação e Visualização da Dinâmica de Veículos.

## Palavras-chave

1- Dinâmica de veículos; 2 – veículos deformáveis; 3 - análise e simulação de colisões; 4 - reconstituição de acidentes; 5 – engenharia forense; 6 – adequabilidade à colisão.

## Abstract

Carvalho, Fábio V.. **Flexible Vehicles Models for the Analysis and Simulation of Collisions and Accident Reconstruction**. Rio de Janeiro, 2004. 136p. M.Sc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A procedure for the simulation of flexible ground vehicles collisions is presented, which uses the conditions at the instant just before the impact as input variables and the evolution of the dynamic variables during the collision as output. Various simulations are presented and compared to similar cases found in the literature, what validates the proposed models. The algorithm was implemented using Simulink/Matlab software and used the same structure of the other programs under development in this area, in order to integrate it to graphic pre-processors and post-processors available in SVDV program – Simulation and Visualization of Vehicle Dynamics.

## Keywords

1- Vehicle dynamics; 2 – flexible vehicles; 3 – analysis and simulation of collisions; 4 – accident reconstruction; 5 – forensic engineering; 6 - crashworthiness.

## Sumário

1	Introdução	16
2	Modelos analíticos para veículos deformáveis	20
2.1.	Modelo analítico (Genta – 1997 / Macmillan - 1983)	20
2.1.1.	Colisão frontal contra um obstáculo fixo	20
2.1.2.	Colisão frontal entre veículos	28
2.1.3.	Colisão oblíqua entre Veículos	30
2.2.	Modelo Maxwell (Huang – 2002)	31
2.3.	Modelo para choque central – frontal entre dois veículos	34
3	Modelos computacionais para o tratamento de colisões veiculares planas	37
3.1.	Determinação dos parâmetros de rigidez de veículos	37
3.1.1.	Generalização dos parâmetros de rigidez	44
3.2.	Modelos empregados em programas comerciais	45
3.2.1.	Modelo deformável com uso de vetores radiais (programa SMAC)	45
3.2.1.1.	Restituição	48
3.2.2.	Modelo deformável com uso de vetores radiais (programa M-SMAC)	49
3.2.3.	Modelo baseado em conservação de quantidade de movimento (programa CRASH)	50
3.2.4.	Modelo para veículo deformável, baseado em elementos discretos mola – amortecedor em série (programa SINRAT)	55
4	Modelos para colisões planas de veículos deformáveis	60
4.1.	Choque central frontal veículo deformável – barreira rígida	60
4.2.	Choque frontal central entre dois veículos	64
4.3.	Colisões bidimensionais entre dois veículos	67
4.3.1.	Entrada de dados e discretização do veículo	70
4.3.2.	Discretização	72
4.3.3.	Modelo dinâmico	74
5	Simulações de colisões planas de veículos deformáveis	81
5.1.	Choque central frontal veículo deformável – barreira rígida	81
5.1.1.	Colisão de um veículo de transporte de carga leve contra barreira rígida	82
5.1.2.	Testes com diferentes valores de rigidez	85
5.2.	Choque central frontal entre dois veículos	87
5.2.1.	Colisão de um veículo de transporte de carga leve contra barreira rígida	87

5.2.2. Colisão frontal entre dois veículos diferentes	89
5.2.3. Colisão frontal entre dois veículos com grande diferença de rigidez e massa	92
5.3. Colisões bidimensionais entre dois veículos	94
5.3.1. Colisão de veículo de transporte de carga leve contra barreira rígida	94
5.3.2. Choque frontal localizado contra obstáculo rígido fixo (veículo – poste)	96
5.3.3. Colisão frontal central entre dois veículos	99
5.3.4. Colisão frontal com deslocamento entre dois veículos (offset)	101
5.3.5. Colisão frontal oblíqua veículo de carga leve – barreira rígida	105
5.3.6. Dinâmicas Discrepantes	108
6 Conclusões e sugestões	111
6.1. Conclusões	111
6.2. Sugestões	112
7 Referências bibliográficas	114
Apêndice A Código em Matlab dos modelos criados	120
A.1 Choque central frontal veículo deformável – barreira rígida	120
A.1.1 barreirarígida.mdl	120
A.1.2 dados.m	121
A.1.3 geometria.m	121
A.1.4 amortecedor.m	121
A.2 Choque frontal central entre dois veículos	122
A.2.1 choque.mdl	122
A.2.2 amortecedor1.m	123
A.2.3 amortecedor2.m	123
A.3 Colisões bidimensionais entre dois veículos	123
A.3.1 colisao.m	123
A.3.2 veiculos.m	124
A.3.3 posicionamento_inicial.m	125
A.3.4 divisao_inicial.m	125
A.3.5 divisao.m	126
A.3.6 rigidez.m	127
A.3.7 choque.mdl	129
A.3.7.1 veiculo1 e veiculo2	130
A.3.7.2 elementos flexíveis	130
A.3.7.3 contato	131
A.3.8 loctoglob.m	131

A.3.9 globtoloc.m	131
A.3.10 taxa.m	131
A.3.11 resultante.m	132
A.3.12 elastica.m	132
A.3.13 isinploly.m	132
A.3.14 amortecedores.m	133
A.3.15 deformações	133
A.3.16 atualiza(u)	134
A.3.17 contato(u)	134
A.3.18 plota_matriz(u)	134
A.3.19 plota_matriz2(u)	134

## Lista de figuras

Figura 1: Esquema da estrutura proposta para integração entre os programas de simulação veicular em desenvolvimento na PUC-Rio.	18
Figura 2: (a) Força que o veículo recebe do obstáculo durante um teste de impacto como uma função de tempo. Curva experimental e lei empírica matemática. (b) Histórico $V(t)$ , $a(t)$ e $s(t)$ obtidos através da lei empírica $F(t)$ .	21
Figura 3: Força recebida pelo veículo durante uma colisão frontal contra o obstáculo como uma função da deformação $s$ .	23
Figura 4: Gráfico $e^*(\bar{F})$ aproximado pela Equação 13.	25
Figura 5: Gráficos $F(t)$ , $a(t)$ , $V(t)$ e $s(t)$ .	27
Figura 6: Colisão frontal entre veículos. (a) modelo físico; (b) forças como funções da deformação dos veículos.	28
Figura 7: Diagrama polar $K(\theta)$ aproximado por dois arcos de elipse.	30
Figura 8: (a) Colisão oblíqua central. (b) Colisão oblíqua na qual o veículo A colide com a parte frontal do veículo B.	31
Figura 9: Representação física do modelo utilizado.	31
Figura 10: Comportamento dos sistemas mola-amortecedor em série, de acordo com o amortecimento viscoso.	34
Figura 11: Esquema físico do modelo para colisões unidimensionais entre dois veículos.	34
Figura 12: Modelo em grafo de ligação para colisão unidimensional entre dois veículos.	34
Figura 13: Deformação de um veículo durante um choque frontal (a) - com deformações elástica e plástica conjugadas e (b) – com deformação puramente elástica, nos instantes (1) imediatamente anterior ao choque (sem deformação), (2) velocidade nula (deformação máxima) e (3) Fim do choque (deformação residual).	38
Figura 14: Gráfico Força x Deformação típico, traçado a partir de um teste de impacto frontal contra uma barreira rígida.	38
Figura 15: a) Linearização da força em função da deformação total ( $\delta$ ); b) Linearização da força em função da deformação residual ( $\delta_p$ ), onde a parte negativa do eixo das abscissas representa a deformação elástica ( $\delta_e$ ). (Söderberg & Tidborg – 1999)	40

Figura 16: (a) Gráfico de velocidade inicial de impacto x deformação, obtido da integração da curva força x deformação; (b) Gráfico de energia dissipada x deformação, obtido aplicando-se a expressão $v_i = \sqrt{2E/m}$ no gráfico anterior.	42
Figura 17: Variáveis associadas à área de choque.	42
Figura 18: Gráficos de (a) velocidade inicial x deformação total e (b) velocidade inicial x deformação plástica.	43
Figura 19: Vetores pi traçados para monitorar o contato entre os veículos envolvidos, na área definida pelos ângulos $\phi_i$ e $\phi_f$ .	47
Figura 20: Curva de Força x Deformação total durante a compressão em um choque, segundo a modelagem do programa EDSMAC.	47
Figura 21: Modelo de restituição do EDSMAC, onde vetor $\rho$ segue a trajetória A-B-C, durante o carregamento e C-D-E, na restituição.	48
Figura 22: Modelo de Esforço x Deformação utilizado no M-SMAC.	49
Figura 23: Esquema físico para modelo de colisão bidimensional.	52
Figura 24: (a) – Direção do impulso definida pelo ângulo P; (b) - Discretização de um veículo em elementos de mola lineares.	54
Figura 25: Elemento mola discretizado ao longo do perfil deformado w.	54
Figura 26: Medidas de deformação em um veículo – quatro medidas usadas para a deformação frontal e seis medidas para a deformação traseira.	55
Figura 27: Representação do contato entre dois veículos segundo o modelo de Vera et al. (1993).	56
Figura 28: Divisão das áreas da superfície de um veículo segundo as constantes de amortecimento e rigidez: a) Parte frontal; b) Parte lateral.	58
Figura 29: Elemento flexível utilizado para simular contato entre os veículos.	59
Figura 30: Modelo massa – mola – amortecedor em série (Maxwell)	61
Figura 31: Diagrama de blocos em Simulink para o elemento flexível (mola – amortecedor) utilizado no modelo.	62
Figura 32: Modelo para a massa do veículo.	62
Figura 33: Modelo físico para a barreira rígida.	63
Figura 34: Modelo para choque frontal de veículo flexível com barreira –rígida fixa.	63
Figura 35: Força aplicada sobre o ponto de contato pelo veículo 1 (F), devido a deformação resultante da velocidade relativa (V1-VP), onde V1 é a velocidade do veículo 1 e VP a velocidade do ponto P.	64
Figura 36: Representação da dinâmica do veículo 1.	65
Figura 37: Modelo unidimensional para colisão central entre dois veículos.	65

Figura 38: Representação dos elementos flexíveis.	66
Figura 39: Modelo em Simulink para o veículo 2.	66
Figura 40: (a) Modelo físico de um veículo com divisão de sua região frontal em três elementos; (b) Representação do contato entre dois veículos, segundo o modelo bidimensional criado.	68
Figura 41: Fluxograma do modelo bidimensional.	69
Figura 42: Tipos de impacto.	70
Figura 43: Geometria do veículo no modelo bidimensional.	70
Figura 44: Posicionamento inicial dos veículos no modelo bidimensional.	71
Figura 45: Armazenamento das coordenadas dos pontos que discretizam os veículos envolvidos. Neste caso, o veículo 1 tem sua região traseira afetada e o veículo 2 sofre impacto nas laterais.	72
Figura 46: Representação da dinâmica do veículo no Simulink.	75
Figura 47: Modelo bidimensional para colisão veicular no Simulink.	76
Figura 48: Exemplo de aplicação da matriz teste no cálculo da matriz que contém as taxas de deformação dos elementos discretizados.	77
Figura 49: Elementos flexíveis utilizados na modelagem bidimensional de choque entre dois veículos.	78
Figura 50: Teste de contato entre os veículos.	79
Figura 51: Somatório dos ângulos a) para um ponto interior a um polígono. b) para um ponto externo ao polígono.	80
Figura 52: Gráficos de (a) aceleração x tempo e de (b) velocidade x tempo para simulação de carro de passeio grande contra barreira rígida a 15,65 m/s (56 km/h).	82
Figura 53: Gráficos de velocidade e de aceleração em choque contra barreira rígida em laboratório e em uma simulação por elementos finitos extraídos de Zouk et. al – 1998.	83
Figura 54: Gráficos de deformação total, deformação plástica e deformação elástica x tempo obtidos da simulação de choque central frontal de veículo contra barreira rígida.	84
Figura 55: Gráfico de força x deformação obtido na simulação de choque central frontal de veículo contra barreira rígida.	84
Figura 56: Curvas de aceleração do modelo com diferentes valores de rigidez.	85
Figura 57: Gráficos de Deformação x tempo com uso de: (a) Rigidez alta; (b) Rigidez Regular; (c) Rigidez baixa.	86
Figura 58: Gráficos de velocidade, aceleração e deformação resultantes da	

simulação de choque frontal de uma pick-up contra barreira rígida fixa.	88
Figura 59: Esquema do choque entre uma pick-up (van) e um carro médio simulado.	90
Figura 60: Gráficos de (a) aceleração x tempo e (b) velocidade x tempo obtidos na modelagem do choque frontal entre um veículo de carga leve e um veículo médio.	90
Figura 61: Gráficos de deformação x tempo e de força x deformação obtidos em simulação de choque frontal entre uma pick-up e um veículo médio.	91
Figura 62: Gráfico de força x tempo dos veículos envolvidos no choque	91
Figura 63: Esquema da colisão entre veículos com grande diferença de massa e rigidez simulado.	92
Figura 64: Dados experimentais fornecidos por Jawad – 1998.	93
Figura 65: Gráficos de aceleração x tempo e deformação x tempo obtidos na simulação de choque frontal entre caminhão e carro no modelo unidimensional criado.	93
Figura 66: Gráficos de (a) aceleração x tempo e (b) velocidade x tempo obtidos na simulação de choque frontal veículo de carga leve – barreira rígida no modelo bidimensional.	95
Figura 67: Saída gráfica fornecida pelo modelo para colisão entre veículo, vermelho, e barreira rígida fixa, azul, onde observa-se o veículo deformado ao final do choque e seu contorno original.	95
Figura 68: Gráficos de aceleração x tempo e velocidade x tempo fornecidos em York – 1999 para uma colisão central frontal de um veículo contra um poste.	96
Figura 69: Gráficos de (a) velocidade x tempo, (b) aceleração x tempo obtidos na simulação de choque frontal localizado contra obstáculo fixo rígido.	97
Figura 70: Saída gráfica da simulação de impacto central localizado contra obstáculo rígido fixo ao final da simulação.	97
Figura 71: Gráficos de (a) deformação plástica e de (b) deformação total, obtidos na simulação de choque frontal localizado contra obstáculo fixo rígido.	98
Figura 72: Variação das velocidades do (a) veículo 1 e (b) do veículo 2 com o tempo durante impacto central frontal.	100
Figura 73: Gráficos das deformações plásticas dos pontos de contorno do (a) veículo 1 e do (b) veículo 2 pelo tempo.	100
Figura 74: Posicionamento dos veículos ao término da simulação do choque central frontal.	101
Figura 75: Gráfico velocidade x tempo dos veículos envolvidos em choque frontal	

com deslocamento, apresentado em York & Day – 1999.	102
Figura 76: Deformações elásticas dos pontos de contorno do veículo simulado.	103
Figura 77: Gráfico de velocidade x tempo obtido na simulação de choque frontal com deslocamento entre dois veículos de carga leve.	103
Figura 78: Posicionamento dos veículos em 64ms e 88ms em (a) York & Day – 1999 e (b) na simulação realizada.	104
Figura 79: Gráfico de aceleração x tempo obtido na simulação de choque frontal com deslocamento entre dois veículos.	104
Figura 80: Esquema da colisão de veículo médio contra barreira rígida oblíqua.	105
Figura 81: Gráficos de aceleração x tempo e velocidade x tempo experimentais e das simulações apresentadas em Day & York- 2000.	105
Figura 82: Gráfico velocidade x tempo obtido na simulação de choque oblíquo.	106
Figura 83: Gráfico aceleração x tempo obtido na simulação de choque oblíquo contra barreira rígida.	107
Figura 84: Imagem ampliada de dois instantes subseqüentes, mostrando: (a) ponto P pertencente ao veículo em contato com a barreira rígida e (b) ponto P pertencente ao veículo após perder contato com a barreira rígida.	107
Figura 85: Trajetória obtida em uma simulação de choque oblíquo contra barreira rígida (a) no modelo apresentado em Day & York-2000 e (b) no modelo numérico desenvolvido.	108
Figura 86: Plotagem dos autovalores complexos da matriz de estados do modelo analítico de colisão frontal entre dois veículos deformáveis variando-se a massa do ponto de contato de 0,1 kg a 100 kg em intervalos de 10.	109
Figura 87: Conseqüência na determinação do contato entre os veículos da instabilidade numérica provocada pelo valor baixo (0,1 kg) arbitrado para a massa do ponto de contato.	110