

SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL DE VEÍCULOS ARTICULADOS

José Antônio Ferreira Borges

Valder Steffen Júnior

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, Bloco M, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil. E-mail: zeborges@mecanica.ufu.br

Resumo

Este trabalho trata da modelagem do comportamento dinâmico de veículos articulados pesados para fins de simulação e otimização computacional. Os modelos matemáticos são desenvolvidos procurando manter a maior fidelidade possível para com o veículo real e consideram os movimentos tridimensionais, as não linearidades geométricas associadas aos movimentos angulares, a flexibilidade do chassi e o comportamento não linear dos componentes elásticos e dissipativos. São incluídos na análise os modelos auxiliares que definem o ambiente global de simulação: irregularidades da pista e atuação do motorista no volante de direção e sobre o conjunto propulsor. As equações do movimento foram obtidas pelo formalismo de Lagrange e a inclusão da flexibilidade do chassi foi feita pelo Método dos Modos Assumidos. Foi realizado um ensaio experimental visando a validação dos modelos matemáticos. Numa etapa final, foram aplicadas técnicas de otimização seqüencial visando avaliar a possibilidade de melhora automática de alguns aspectos do comportamento dinâmico do veículo.

Palavras-Chave: Modelagem não linear. Veículos articulados pesados. Simulação e otimização computacional.

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento dinâmico de veículos sempre foi muito importante sob todos os pontos de vista, porém, até alguns anos atrás a indústria automobilística nacional valia-se quase que exclusivamente de métodos experimentais para suas análises. Esta prática permite avaliar o desempenho geral do veículo nas mais diversas condições de uso, bem como observar os aspectos relacionados à sua segurança. Apesar de ser uma técnica confiável e apresentar resultados satisfatórios, o método puramente experimental demanda muito tempo para os testes e agrega um custo elevado aos procedimentos.

Atualmente, nota-se na indústria automobilística uma clara tendência de migração para as técnicas computacionais de simulação para análise do comportamento dinâmico de veículos. Entretanto, o uso da simulação computacional não visa substituir os ensaios experimentais e sim auxiliar na avaliação de um número maior de possibilidades de projeto dentro de um prazo cada vez mais curto e a um custo menor. A simulação também contribui para que os experimentos sejam mais eficientes, pois parte-se da hipótese de que o veículo a ser ensaiado encontra-se em um nível mais elevado de desenvolvimento.

As técnicas computacionais, por sua vez, continuam valorizando a experiência de projeto acumulada ao longo dos anos pelas indústrias automobilísticas. Sob este ponto de vista pode-se afirmar que os engenheiros e técnicos passam a dispor de mais uma poderosa ferramenta de desenvolvimento.

Para que as vantagens da simulação sejam efetivas é necessário que os modelos matemático-computacionais implementados representem fielmente o veículo em estudo. Na prática industrial isto quase sempre é uma tarefa difícil, pois os veículos atuais apresentam grande sofisticação tecnológica.

Outra característica importante das técnicas computacionais é a possibilidade de se acoplar algoritmos de otimização numérica às rotinas de simulação. Esta prática pode ampliar as vantagens da simulação, obtendo projetos ótimos em um tempo ainda mais curto e a um custo mais baixo.

2. MODELO MATEMÁTICO

O veículo utilizado como base para este trabalho foi um caminhão extra pesado do tipo cavalo-carreta em suas configurações mais usuais. Foram desenvolvidos três modelos matemáticos, sendo um do caminhão isolado e outros dois com o caminhão acoplado a carretas de um e três eixos.

O modelo matemático do caminhão é comum aos três veículos. Ele é composto por cinco componentes básicos: chassis, cabine, conjunto propulsor (motor e câmbio), eixo dianteiro (e agregados) e eixo traseiro (e agregados).

Para estabelecer os movimentos dos diversos componentes do sistema, foi definido um referencial inercial cuja origem coincide com o centro de massa do chassis do caminhão no instante inicial. Em cada componente do veículo existe um sistema de eixos locais cujas origens coincidem com o seu centro de massa e sentidos positivos inicialmente paralelos aos eixos inerciais.

A escolha dos graus de liberdade foi baseada principalmente nas restrições de movimento impostas pelas ancoragens aos componentes do veículo real. É importante ressaltar que as restrições dos movimentos, bem como os graus de liberdade considerados para os componentes, são tomados em relação ao chassis do caminhão ou da carreta (Borges, 1995).

O chassis do caminhão funciona como uma peça básica, com ampla liberdade de movimento e sobre o qual são montados todos os outros componentes. Neste caso foram considerados seis graus de liberdade de corpo rígido, aos quais soma-se os efeitos de seus movimentos flexíveis (flexão e torção).

Normalmente a cabine é montada no chassis por meio de dois coxins na parte dianteira e por uma mola de lâmina e dois amortecedores hidráulicos na traseira. Esta fixação privilegia os movimentos verticais, enquanto restringe os movimentos laterais. Baseado nisto, foram considerados o movimento vertical e suas duas rotações em torno dos eixos longitudinal e transversal à cabine.

O conjunto propulsor é composto pelo motor, embreagem e câmbio. Sua fixação mais comum é obtida através de quatro coxins bastante rígidos que privilegiam o movimento vertical. Uma vez que a principal excitação do conjunto propulsor é dada pelo torque do motor, optou-se por considerar como único grau de liberdade deste componente a sua rotação em torno do eixo longitudinal.

Os eixos do caminhão são montados no chassis através de molas de lâminas, amortecedores hidráulicos e barras estabilizadoras. As molas de lâmina possuem rigidez vertical bem definida e possuem características que restringem os movimentos laterais. Desta forma, os movimentos considerados são a translação vertical e a rotação em torno do eixo longitudinal.

No caso dos veículos com carreta, assume-se que a articulação (composta pela quinta roda e pino rei) permite dois movimentos: rotação em torno do eixo transversal (excitado quando o conjunto se movimenta verticalmente) e rotação em torno do eixo vertical que passa pelo pino rei (excitado quando o veículo percorre uma curva).

Todos os eixos de carreta (de um ou três eixos) apresentam movimentos semelhantes aos eixos do caminhão. A única diferença significativa é que na carreta de três eixos o sistema de suspensão inclui as balanças. Elas são elementos que fazem a ligação entre as molas de um mesmo lado do veículo, distribuindo melhor a carga quando da passagem por obstáculos. São pivotadas no chassis da carreta e o seu único movimento possível é a rotação em torno de um eixo transversal ao veículo, passando pela sua articulação. Na figura 1 é mostrado um desenho esquemático do veículo em sua configuração mais completa, o sistema de referência inercial, os sistemas locais e a indicação dos movimentos considerados no modelo.

A influência do comportamento flexível sobre os movimentos de corpo rígido é estabelecida pela inclusão da solução em série e suas derivadas nos deslocamentos e velocidades dos pontos de ancoragem dos elementos elásticos e amortecedores. Estes mesmos elementos excitam o movimento flexível através de forças generalizadas Q_i , determinadas em termos do trabalho virtual δw realizado pelas forças externas f_k ao longo dos deslocamento virtuais δr_k . A equação (2) expressa o trabalho virtual associado a um sistema submetido a nf forças externas.

$$\delta w = \sum_{k=1}^{nf} f_k \delta r_k \quad (2)$$

A interação do veículo com o ambiente se dá de diversas maneiras. Matematicamente esta interação é introduzida nas equações do movimento na forma das forças generalizadas Q_i ou de uma excitação pela base. Neste trabalho foram desenvolvidos sub-sistemas auxiliares que representam os seguintes efeitos (Borges, 1999):

- Perfil da pista: Composto de um perfil básico de segmentos de plano sobre os quais pode-se acrescentar obstáculos isolados ou um padrão de irregularidades geradas aleatoriamente a partir de funções densidade espectral de potência. A figura 3 mostra um trecho de pista com irregularidades e um obstáculo isolado.

- Controle direcional: A atuação no volante de direção pode ser imposta ou deixada a cargo de um controlador PID que tenta seguir uma trajetória especificada.

- Conjunto propulsor: A força de tração é determinada em cada instante a partir de diagramas de força disponível em função da velocidade do veículo e da marcha utilizada. Os tempos de troca de marcha são considerados.

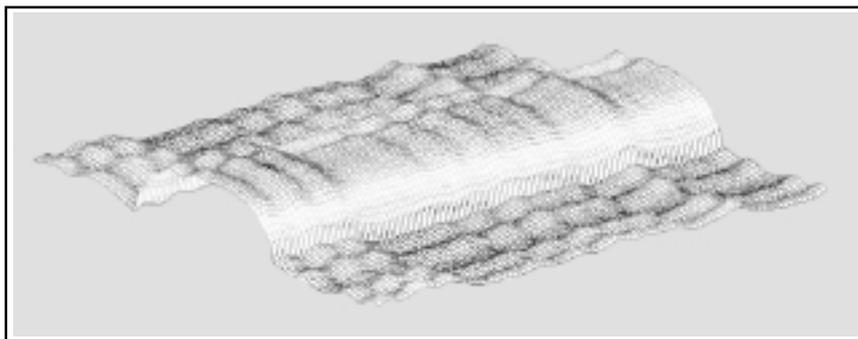


Figura 3. Exemplo de trecho de pista com irregularidades e um obstáculo isolado.

3. PROGRAMA COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO

O programa computacional de simulação foi escrito na linguagem FORTRAN e a entrada e saída de dados é feita através de arquivos padrão ASCII. Para a integração das equações do movimento foram implementados dois algoritmos numéricos com características de precisão e robustez diferentes: Runge-Kutta de quarta ordem e Newmark (Bathe and Wilson).

Uma vez que a simulação dos modelos matemáticos implica na manipulação de uma grande quantidade de dados de entrada e saída, foi desenvolvida uma interface gráfica visando promover uma operação fácil e segura.

A estrutura geral da interface baseia-se no conceito de oferecer ao usuário apenas as opções e recursos necessários ao veículo escolhido. Definido o veículo, tornam-se disponíveis as opções de criação e edição de componentes que passam a fazer parte de uma biblioteca para posterior utilização. Na figura 4 são mostradas imagens de algumas telas da interface.

4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A dinâmica de veículos contempla os movimentos que ocorrem em três direções: vertical, lateral e longitudinal. Os movimentos segundo estas direções es-

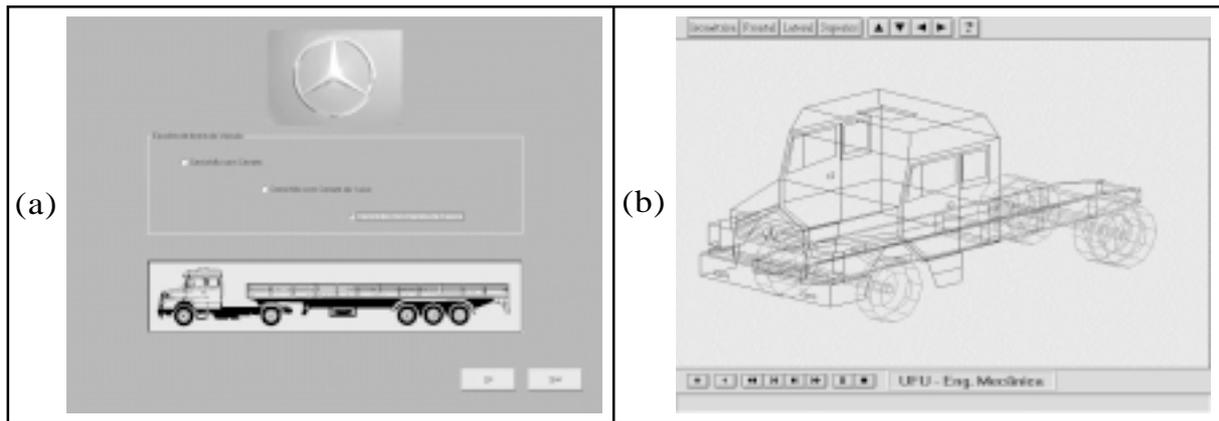


Figura 4. Telas da interface gráfica: a) Definição do veículo b) Animação gráfica.

tão acoplados no comportamento dinâmico global do sistema, porém o seu estudo em separado é válido pois representa uma parcela significativa das condições reais de uso do veículo. Além disto, o comportamento apresentado em situações onde os movimentos em direções diferentes se acoplam pode ser inferido com razoável precisão a partir da análise em separado para várias condições de operação.

Os ensaios experimentais realizados foram divididos em três etapas:

- Medições longitudinais sob aceleração controlada: O veículo parte do repouso e acelera até uma velocidade limite de segurança. As marchas são trocadas numa seqüência previamente estabelecida ao ser atingida a rotação de potência máxima do motor. São medidos o tempo de troca das marchas, o tempo em que cada marcha permaneceu engatada, o deslocamento, a velocidade e a aceleração do veículo ao longo de todo o percurso de teste.

- Tráfego sobre um ou mais obstáculos com perfil definido: O veículo passa, em linha reta e com velocidade constante, sobre um ou mais obstáculos inseridos em sua trajetória. Cada obstáculo se destaca do perfil normal da pista, caracterizando uma excitação específica. O obstáculo possui geometria definida e se mantém fixo no solo durante todo o teste. A velocidade do veículo foi ajustada de forma a não provocar o descolamento do pneu do solo durante as medições. Foram medidos os sinais de vários acelerômetros espalhados pelos componentes do veículo, conforme mostra a figura 5. Foram feitas medições com os obstáculos posicionados sobre a pista em três configurações diferentes visando excitar uma gama maior de movimentos.

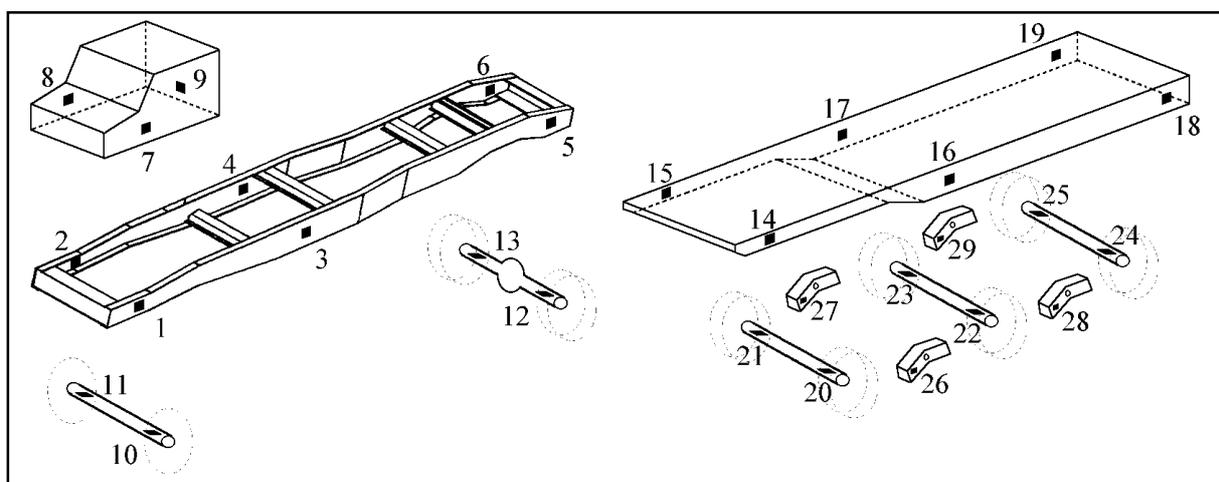


Figura 5. Locais de fixação dos acelerômetros. Nas posições 1, 3, 5, 14, 16 e 18 foram montados dois acelerômetros, um vertical e outro lateral.

- Medições de características da dinâmica lateral acoplada à vertical: O veículo trafega em linha reta e com velocidade constante quando é submetido a uma perturbação no volante que excita os movimentos laterais e verticais. Logo após a manobra, o veículo é estabilizado e continua movendo-se em linha reta. São medidos os sinais dos acelerômetros posicionados vertical e lateralmente. A manobra é registrada por um sensor potenciométrico instalado no volante de direção.

5. RESULTADOS

O cálculo da posição de equilíbrio estático é importante nos veículos de carga uma vez que esta posição pode variar grandemente em função do peso total do conjunto e da sua distribuição. A deflexão estática das molas do caminhão em vazio são dados conhecidos do fabricante e constam de seus relatórios de cálculo. Na tabela 1, são mostrados os valores reais e aqueles obtidos através de simulação com o veículo vazio. Pelos dados da tabela observa-se uma diferença de apenas 3,7 mm nas molas dianteiras e de 9,2 mm nas traseiras.

Tabela 1. Deflexão estática das molas do caminhão em vazio.

	Eixo Dianteiro [mm]	Eixo Traseiro [mm]
Valor Real	145,8	31,4
Valor de Simulação	142,1	40,6

As medições associadas à dinâmica longitudinal foram realizadas conforme descrito no item 4. Com os parâmetros dos ensaios conhecidos, foram feitas simulações sob as mesmas condições e obteve-se bons resultados. Na figura 6 pode-se ver os resultados para a velocidade em função da posição na pista de teste para o conjunto cavalo-carreta carregado. Neste ensaio foram usadas quatro marchas, correspondendo a três trocas.

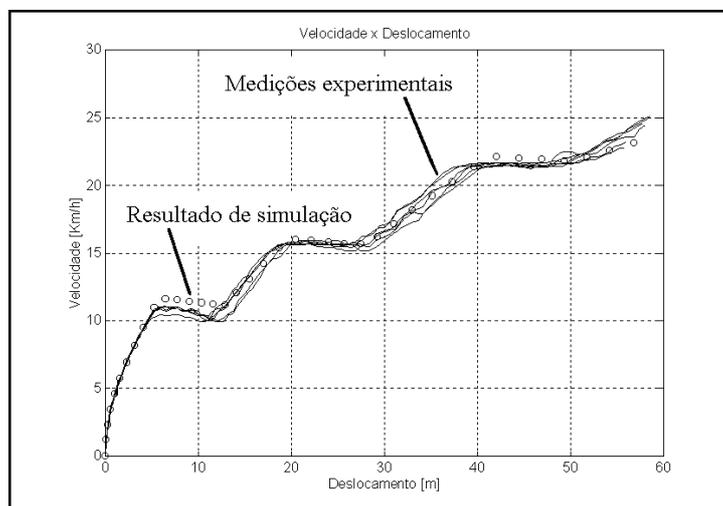


Figura 6. Velocidade do conjunto cavalo-carreta em função do deslocamento.

No caso da dinâmica vertical, a comparação entre simulação e medições experimentais mostrou bons resultados para o caminhão isolado em todas as situações analisadas. Para o conjunto cavalo-carreta, a simulação não representou as medições experimentais. Provavelmente isto se deve à incerteza presente nos parâmetros de rigidez e inércia da carreta, cuja estimativa não atingiu o grau de precisão obtido para o caminhão (dados fornecidos pelo fabricante). Na figura 7 é mostrado um gráfico da aceleração vertical do chassi do caminhão ao passar com suas rodas esquerdas sobre um obstáculo isolado.

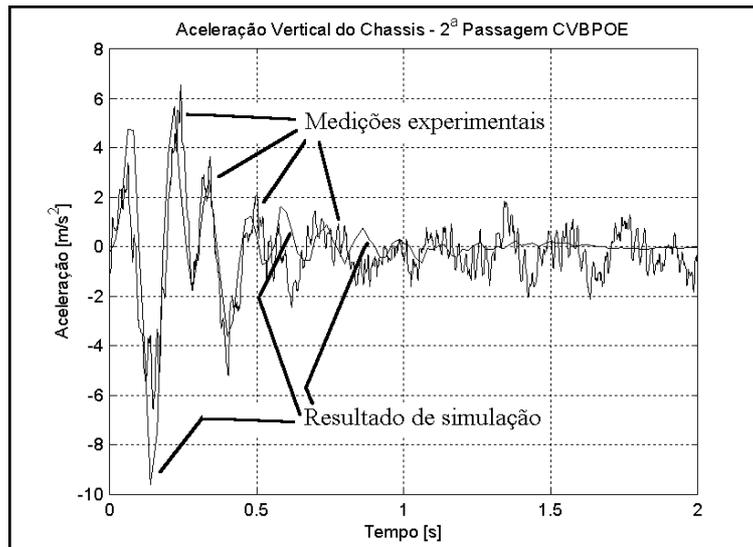


Figura 7. Resposta no tempo para o caminhão passando por obstáculo do lado esquerdo.

Os resultados experimentais obtidos para a manobra lateral não permitiram a sua utilização para efeito de comparação com a simulação. Apesar da atividade no volante de direção ter sido registrada satisfatoriamente pelo sensor potenciométrico, os acelerômetros posicionados lateralmente no chassi não conseguiram definir os movimentos adequadamente.

A utilização das técnicas de otimização seqüencial para melhorar o comportamento dinâmico de veículos mostrou ser um problema complexo. Uma vez que os modelos matemáticos são computacionalmente pesados, um número significativo de avaliações da função objetivo pode ser proibitivo. Além disto, é muito difícil estabelecer uma função objetivo que represente o efeito desejado em todas as condições de operação do veículo. Caso não se faça uma análise criteriosa desta função, corre-se o risco de otimizar um projeto para apenas uma condição específica.

Durante os testes realizados observou-se dois efeitos importantes. O primeiro é notado à medida que o algoritmo de otimização avança e faz alterações nas variáveis de projeto. Dependendo de quais sejam estas variáveis e do nível de sua variação, a posição de equilíbrio estático pode mudar e com isto o sistema apresenta uma oscilação inicial. Esta oscilação pode mascarar o cálculo da função objetivo caso ela seja baseada em uma função integral da resposta no tempo. Outro efeito que ocorre é a necessidade de estabelecer restrições para as variáveis de projeto associadas às curvas características de componentes elásticos e dissipativos, no sentido de garantir que estas curvas sejam possíveis de se obter a partir de um elemento mecânico real.

A figura 8 ilustra um exemplo de otimização aplicado ao caminhão onde o objetivo da análise é reduzir o nível de vibração da cabine. As possibilidades analisadas envolveram o estabelecimento de várias funções objetivo, todas elas associadas à redução da integral da energia cinética da cabine ao longo do tempo ou à redução da integral dos deslocamentos da cabine ao quadrado. No total foram consideradas 17 variáveis de projeto, que são: coordenadas x, y e z dos coxins da cabine, 7 pontos que definem a curva característica de rigidez da mola da cabine e 7 pontos que definem a curva característica de funcionamento dos amortecedores da cabine. As variáveis de projeto estão submetidas apenas a restrições laterais.

Os resultados obtidos mostraram uma modesta redução nos níveis de vibração, correspondendo a uma redução de 12,36 % na função objetivo associada à integral da energia cinética da cabine e de 23,4 % na função objetivo associada à integral dos deslocamentos da cabine ao quadrado. Estes resultados podem ser interpretados como sendo um caso onde o projeto original já se encontra numa configuração bastante próxima do ótimo, o que é esperado tratando-se de um veículo comercial moderno.

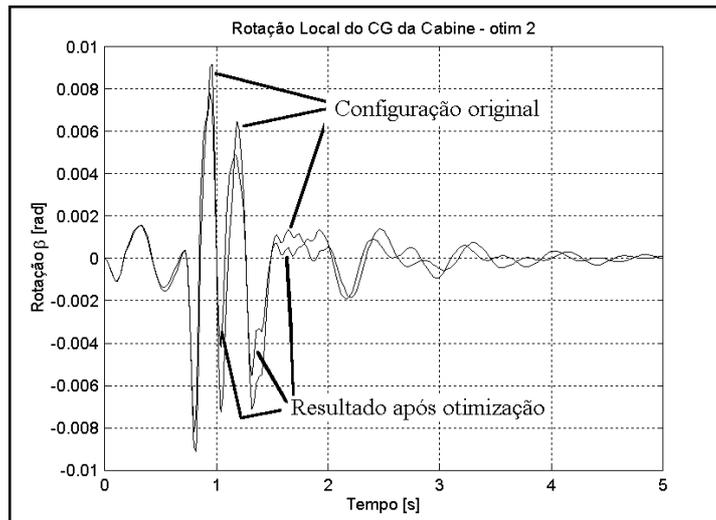


Figura 8. Resultado de otimização usando como função objetivo a integral da energia cinética da cabine.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o estudo do comportamento dinâmico de veículos articulados utilizando técnicas de modelagem, simulação, experimentação e otimização numérica que se mostraram adequadas aos objetivos propostos. Os modelos desenvolvidos permitem a análise do veículo em um grande número de situações reais. A comparação entre simulação e ensaios experimentais mostrou bons resultados nos casos em que os parâmetros do veículo eram conhecidos de forma precisa. A metodologia de otimização usando técnicas de minimização seqüencial apresentou bom desempenho, entretanto, mais estudos devem ser feitos no sentido de aprimorar a seleção das funções objetivo.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Mercedes-Benz do Brasil S.A. pelo suporte deste trabalho de pesquisa (projeto UNI).

8. REFERÊNCIAS

- Bathe, K.J and Wilson, E.L., "Numerical Methods in Finite Element Analysis", 528 p.
- Borges, J.A.F., 1995, "Modelagem Tridimensional Não Linear de Veículos Articulados Pesados do Tipo Cavalo Mecânico - Carreta", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, 190 p.
- Borges, J.A.F., 1999, "Dinâmica de Veículos Articulados: Simulação Computacional, Otimização e Ensaio Experimentais", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, 213 p.
- Meirovitch, L., 1997, "Principles and Techniques of Vibrations", Prentice-Hall, USA, 560 p.