

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE PARÂMETROS ASSOCIADOS À DINÂMICA DE VEÍCULOS

Marcus de Freitas Leal

Universidade Federal de Uberlândia
mfleal@mecanica.ufu.br

José Antônio Ferreira Borges

Universidade Federal de Uberlândia
zeborges@mecanica.ufu.br

Resumo: *Procedimentos de análise numérica aplicados ao estudo do comportamento dinâmico de veículos, além de reduzir o tempo e custos associados ao desenvolvimento, facilitam a obtenção de informações importantes sobre o veículo em diferentes configurações de projeto. Neste sentido, foi proposto o desenvolvimento de um projeto de veículo através da utilização conjunta da técnica de multicorpos e método dos elementos finitos. A metodologia envolve a definição de: modelos de geometria CAD para os componentes de um veículo de referência, comportamento dinâmico vertical através de teste de campo com o veículo e propriedades de rigidez para molas, pneus e buchas. As propriedades de inércia para o chassi, eixos, conjunto propulsor e carroceria são obtidos por meio de um dispositivo que opera como um sistema pendular. A simulação do modelo é realizada sob várias condições levando em conta o perfil de obstáculos, velocidade, pressão dos pneus e carregamento. Por fim, são feitas as conclusões com base nas análises e comparações de resultados obtidos, além das expectativas de trabalhos futuros.*

Palavras-chave: *Dinâmica Veicular, Validação Experimental, Projeto de Veículos.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente podemos observar no desenvolvimento de metodologias de modelagem e simulação computacional, uma tendência caracterizada pelo aumento da complexidade dos modelos, no sentido de torná-los cada vez mais representativos da realidade observada nos veículos (Borges, 1999). Além da perspectiva de se prever de maneira mais adequada o comportamento dinâmico de um veículo, uma vez que são consideradas no modelo as influências simultâneas do acoplamento de vários sistemas, esta abordagem reduz a necessidade de que vários modelos sejam criados para diferentes análises (Robert, 2000). Em contra-partida, o aumento da complexidade do modelo torna mais difícil o gerenciamento de informações tanto para a elaboração do modelo quanto para sua validação.

Em grande parte, esta tendência no desenvolvimento dos projetos de veículos tem sido possível devido o auxílio de vários códigos matemáticos desenvolvidos com o objetivo de facilitar a análise dos sistemas dinâmicos. Programas comerciais como o ADAMS® e o AUTOSIM® proporcionam a simulação da dinâmica de corpos rígidos segundo a técnica de multicorpos, além de códigos desenvolvidos com base no método dos elementos finitos, como ANSYS®, NASTRAN®, ABAQUS® e GENESIS®. Estes, auxiliam na solução de problemas como a determinação de tensões e deformações em elementos estruturais submetidos a carregamentos estáticos e dinâmicos, problemas que tratam da determinação de frequências naturais e modos de vibração de meios sólidos, entre outros.

Dois aspectos principais devem ser levados em conta quando métodos computacionais e experimentais são aplicados conjuntamente no estudo da dinâmica e projeto de veículos: a determinação de parâmetros de entrada para os modelos computacionais e a execução de ensaios experimentais para a caracterização do comportamento dinâmico dos sistemas. Estudos realizados por Stevens (1997), são fundamentais para a definição de uma metodologia de projeto eficaz sob o ponto de vista dos fabricantes de automóveis. Nele, os autores apresentam uma metodologia usada na Ford Motor Company para melhorar as características de manobrabilidade (Handling), através de ferramentas CAD e CAE, visando a redução de custos de desenvolvimento e mantendo a alta qualidade. A abordagem envolve a construção de um modelo computacional usando o programa ADAMS[®], e modelos de geometria elaborados em CAD de um veículo modelo F-150. Foram realizados ensaios experimentais (Test Rigs) para obtenção de parâmetros de rigidez e amortecimento de componentes da suspensão. Os parâmetros associados aos pneus foram obtidos através de um equipamento (MTS - Flattrac II) capaz de medir as forças e momentos gerados em um pneu. Ainda neste trabalho (Stevens, 1997), foi realizada a validação de ensaios experimentais, dos quais se destacam, a verificação da geometria de suspensão e direção em testes usando um equipamento chamado de CMM (Coordinate Measuring Machine), a verificação da inércia total do veículo através de um ensaio em uma mesa de oscilação e a caracterização da dinâmica vertical em ensaios de campo com o veículo instrumentado com acelerômetros. De maneira geral trabalhos como este, além dos estudos demonstrados por autores como Sharp (1999) e Subramanyam et al (2000), estabelecem as diretrizes para o desenvolvimento de um projeto de veículo fundamentado em simulações computacionais e ensaios experimentais.

2. MODELO MULTICORPOS DO VEÍCULO

Com o propósito de servir como ponto inicial para a aplicação dos procedimentos de otimização e seleção de componentes, foi proposto a implementação de um modelo que representa um veículo real, tornando-se necessário a obtenção das propriedades físicas e geométricas de um veículo de referência. A partir daí, a modelagem computacional é implementada de acordo com as etapas a seguir:

- Geração de desenhos tridimensionais representativos dos componentes do veículo, com o intuito de obter as propriedades geométricas, além dos parâmetros de inércia para alguns componentes.
- Criação de um conjunto de partes no modelo multicorpos com base na geometria e propriedades obtidas através dos desenhos tridimensionais e ensaios experimentais. Estas partes representam os componentes rígidos que compõe o veículo, como o chassi, eixos, carroceria, etc.
- Estabelecimento dos graus de liberdade para cada parte de acordo com seus principais movimentos.
- Definição de elementos de força para representar componentes flexíveis e dissipativos, como molas, amortecedores, buchas e pneus.

A interação entre o veículo e o ambiente ocorre através do contato dos pneus com o solo sendo representada neste trabalho por modelos analíticos cuja caracterização é feita através de parâmetros de rigidez, amortecimento e coeficiente de atrito com o solo.

A excitação proveniente da pista é considerada no modelo através de deslocamentos impostos aos pneus por meio de bases móveis que se movem sob eles. Os deslocamentos são definidos de acordo com o perfil dos obstáculos usados nos ensaios experimentais de dinâmica vertical (Neto, 1998). Neste caso o modelo do veículo não se move sobre a pista, mas permanece parado sendo excitado pelas bases de forma semelhante ao que acontece em um simulador de protótipos.

As propriedades de rigidez usadas nas molas, buchas e pneus são definidas a partir de suas curvas características de força em função do deslocamento, obtidas através medições experimentais em condições controladas (Leal et al, 2001). Na Fig. (1) é mostrado o modelo do veículo definido em ambiente virtual.

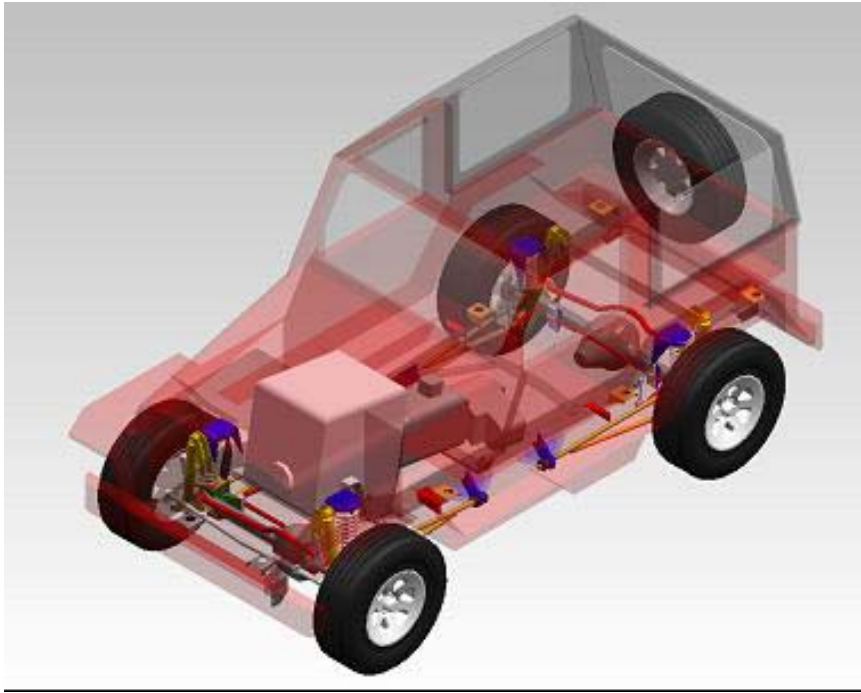


Figura 1 – Modelo CAD do veículo de referência.

2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS

2.1 Propriedades de Inércia

A medição das propriedades de inércia dos componentes se baseia na obtenção dos momentos de inércia de componentes mais importantes no veículo (Garrot et al, 1988). Para isto, foi desenvolvido um dispositivo que consiste em uma plataforma construída com perfis metálicos parafusados, que oscila sobre um eixo metálico maciço apoiado em um par de mancais de rolamento. As extremidades da plataforma são apoiadas sobre molas helicoidais de comportamento linear e com constante de rigidez igual a 21000 N/m.

A bancada funciona como um sistema de 1 grau de liberdade de rotação, desconsiderando os efeitos de flexibilidade nas juntas parafusadas ou nos próprios perfis. Assim sendo, a sua frequência natural estará associada com a massa do sistema, do momento de inércia de massa, da rigidez e distância das molas ao eixo de rotação.

A partir do diagrama de corpo livre e com a hipótese de pequenos deslocamentos angulares deduz-se a equação do movimento para a rotação do sistema. Assim, considerando que as molas apresentam uma taxa de deformação constante com a força aplicada, estão igualmente distantes do eixo de rotação, e têm uma pré-carga inicial suficiente para impedir a perda de contato com seu apoio durante o movimento oscilatório, escreve-se a equação para a frequência natural do conjunto bancada/componente, conforme mostrado na equação (1):

$$\omega^2 = \frac{2 \cdot k \cdot d^2}{I_T} \quad (1)$$

onde, ω é a chamada frequência natural do sistema, k é a constante de rigidez das molas, d é a distância entre o centro de uma mola e o eixo e I_T é o momento de inércia de massa do conjunto bancada/componente em torno do eixo de rotação no mancal de rolamento.

A equação (2) se refere a variação do momento de inércia do componente sob medição, em relação à distância entre o seu CG e o centro de rotação da bancada:

$$I_T = I_{DMI} + (I_c + M_c \cdot H^2) \quad (2)$$

onde, I_{DMI} é o momento de inércia da bancada em relação ao eixo de rotação (obtido via CAD), I_c é o momento de inércia do componente em relação ao seu CG distante H do eixo de rotação, e M_c é a massa do componente.

Introduzindo (1) em (2) e arranjando os termos pode-se escrever a equação que relaciona o momento de inércia do componente (I_c) com a frequência natural não amortecida do sistema (ω) em termos dos parâmetros do dispositivo de medição:

$$I_c = \frac{2 \cdot k \cdot d^2}{\omega^2} - I_{DMI} - M_c \cdot H^2 \quad (3)$$

A frequência natural do conjunto bancada/componente é então medida experimentalmente através de acelerômetro, obtendo o termo ω da equação (1).

A massa do componente e as posições espaciais de seu CG ao longo dos eixo horizontal e vertical são medidas através da pesagem em diferentes condições utilizando uma célula de carga.

Foi realizada uma verificação experimental para o momento de inércia da própria bancada de testes em relação ao valor obtido via CAD, obtendo-se um erro de 7%. Ainda considerando uma posição em que as molas ficam mais próximas do centro de rotação (distância de 0,558 m), o erro cometido na estimativa da inércia da bancada é 0,4%. O aparato utilizado nos ensaios consiste além da bancada de medição de inércia, em um acelerômetro piezo-resistivo e seu condicionador, uma fonte de energia, uma placa de aquisição de dados e um notebook.

De forma semelhante à empregada à bancada, os componentes mais importantes como a carroceria, os eixos e o conjunto propulsor tiveram seus momentos de inércia de “pitch” e “roll” medidos.

2.2. Propriedades de Rigidez

As propriedades de rigidez e amortecimento estão relacionadas com a representação do comportamento de elementos flexíveis e dissipativos como os pneus, molas, buchas, coxins e amortecedores. De forma geral, estes componentes são caracterizados através de curvas de força por deflexão ou força por velocidade (Milliken e Milliken, 1995).

Através de uma máquina universal de ensaios foi possível realizar um levantamento do comportamento de vários componentes do veículo de referência.

Com o intuito de fixar cada um destes componentes nos terminais do equipamento foram construídos diversos suportes específicos, através dos quais, é possível aplicar sobre os componentes esforços de tração e compressão.

As molas e o pneu foram ensaiados à compressão onde os deslocamentos aplicados foram da ordem de 50 mm, e de maneira semelhante para o coxim da carroceria em que esforços cíclicos de tração e compressão foram aplicados em deslocamentos da ordem de 1mm.

3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DINÂMICO

Para caracterizar o comportamento dinâmico vertical do veículo e seus componentes, foi realizado um ensaio experimental que consistiu na passagem do veículo de estudo sobre obstáculos destacados da pista, e medição dos níveis de aceleração em seus principais componentes. Durante o ensaio foi levada em conta a variação de parâmetros associados a pressão dos pneus, carga, posição dos obstáculos na pista e a velocidade longitudinal do veículo (Leal e Borges, 2002), conforme mostrado na Tab. (1).

O procedimento de ensaio consistiu na colocação de acelerômetros em 20 pontos do veículo, divididos em grupos de 8 canais simultâneos. Para efeito de referência entre os acelerômetros de cada grupo, o acelerômetro colocado na posição 1 foi mantido fixo durante todo o ensaio. Desta

forma, foram realizadas cerca de 72 passagens do veículo sobre o obstáculo, sendo 3 passagens para cada uma das 8 condições de parâmetros em 3 grupos de acelerômetros.

Tabela 1 - Planejamento dos experimentos para a combinação dos parâmetros de ensaio.

Condição	Pressão dos Pneus	Carga	Obstáculos	Velocidade
1	1	1	1	1
2	1	1	0	0
3	1	0	1	0
4	1	0	0	1
5	0	1	1	0
6	0	1	0	1
7	0	0	1	1
8	0	0	0	0

Na Tab. (2) estão descritos os códigos 1 e 0 como condições específicas para cada um dos 4 parâmetros que sofreram variação durante os ensaios.

Tabela 2 - Descrição dos códigos 1 e 0 para os parâmetros de ensaio.

Parâmetros	1	0
Pressão	4 pneus com pressão de enchimento de 35 psi	4 pneus com pressão de enchimento de 15 psi
Carga	300 Kg colocados no compartimento traseiro	Sem nenhuma carga
Obstáculos	Dispostos em paralelo	Defasados
Velocidade	2000 rpm em 2ª marcha	1500 rpm em 2ª marcha

O posicionamento dos pontos de medição foi definido de forma a medir os movimentos característicos, do chassi, conjunto propulsor, eixo dianteiro, eixo traseiro e carroceria.

Vale ressaltar que, para o início da aquisição e para o cálculo da velocidade instantânea do veículo sobre os obstáculos, foi usado um sensor ótico fixado ao pára-choque dianteiro em conjunto com duas faixas reflexivas posicionadas a 1 metro de distância uma da outra e a 0,4 m do primeiro obstáculo.

Os parâmetros de aquisição utilizados foram: frequência de amostragem de 1 kHz; tempo de aquisição de 5 segundos; e filtro passa-banda entre 1 Hz e 100 Hz.

A aquisição dos sinais foi feita em computador portátil com placa de aquisição de 8 canais (National Instruments - 6024E) e com interface de comunicação feita pelo software Labview.

4. RESULTADOS OBTIDOS

A partir das propriedades geométricas dos componentes do veículo de referência, foi possível elaborar um modelo multicorpos que entre outros parâmetros, contou com os resultados do ensaio experimental para obtenção das propriedades de massa, inércia e posição espacial dos centros de gravidade. Na Tab. (3) são mostrados alguns dos valores medidos.

Outro conjunto de dados usados na modelagem do veículo envolve os valores de rigidez das molas, dos pneus, do coxim da carroceria. Na Tab. (4) são mostrados os valores, considerando que o comportamento de cada um dos componentes pode ser considerado linear e por isso, pode ser representado através de uma constante.

Uma vez concluído o modelo computacional do veículo de referência, foi possível realizar as simulação do seu comportamento, impondo sobre os pneus um deslocamento compatível com o perfil dos obstáculos e a velocidade linear do veículo no instante da passagem.

Tabela 3 - Valores obtidos para os momentos de inércia de componentes.

Componentes	Massa [kg]	Momentos de Inércia [kg.m ²]
Carroceria	600	Pitch = 815
Conjunto Propulsor	380	Pitch = 600
Eixo Dianteiro	225	Roll = 140
Eixo Traseiro	170	Roll = 127

Tabela 4 - Valores de rigidez e amortecimento obtidos no ensaio de tração e compressão.

Componentes	Valor
Rigidez Radial do Pneu	300000 N/m
Rigidez da Mola Traseira	28000 N/m
Rigidez do Coxim da Carroceria	1200 x 10 ³ N/m

Os sinais no tempo para a aceleração vertical em alguns componentes para o modelo e o veículo real na condição 1 (pneus com pressão de 35 psi, 300 kg de carga, obstáculos paralelos e rotação no motor de 2000 rpm em 2^a marcha), são mostrados nos gráficos das Fig. (2) e (3). Vale lembrar que nos sinais mostrados no domínio do tempo foi aplicado filtro digital passa-baixo em 20 Hz.

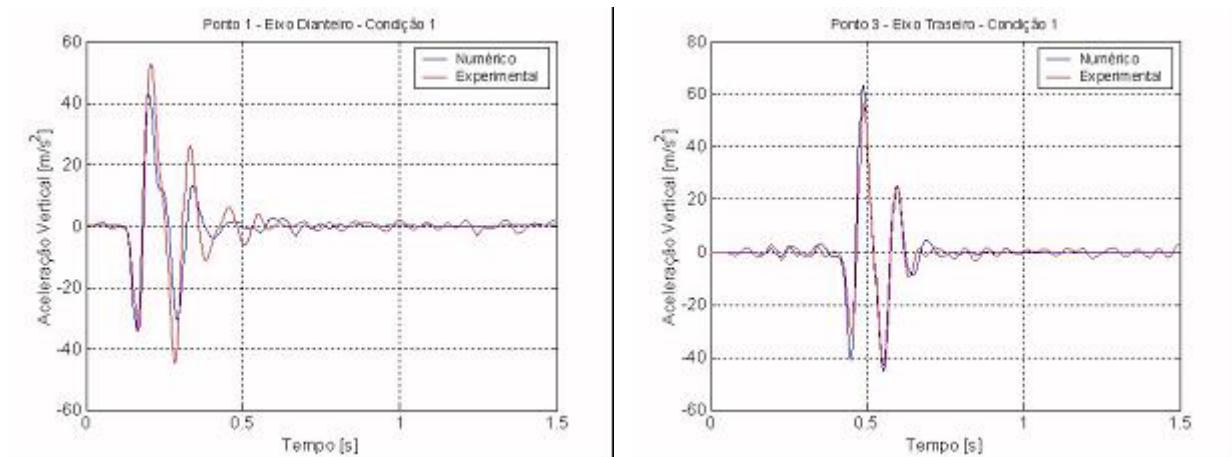


Figura 2 - Comparação entre valores numéricos e experimentais nos eixos.

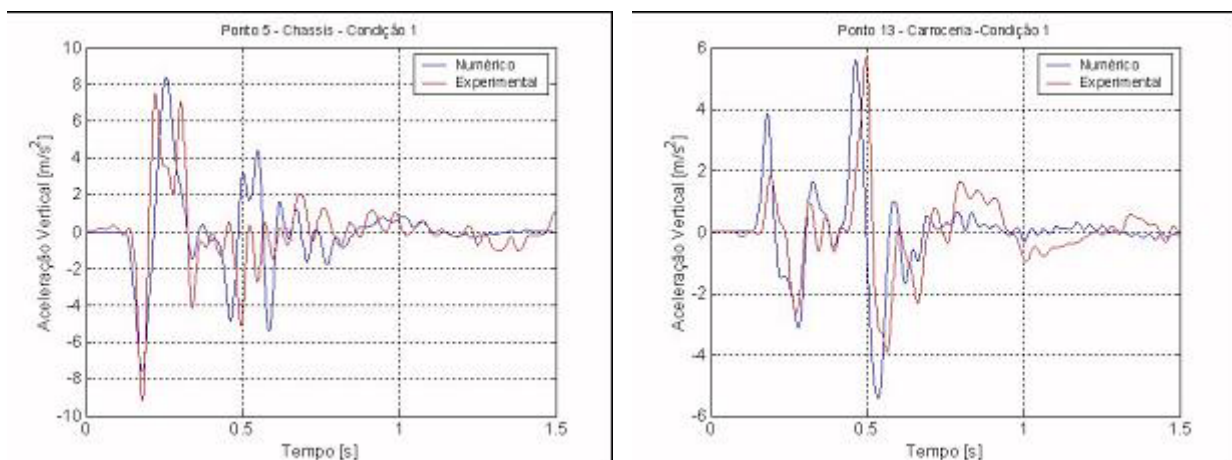


Figura 3 - Comparação entre valores numéricos e experimentais para o chassis e carroceria.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Com base nos resultados mostrados observa-se que, de maneira geral, o modelo computacional se comportou como esperado e de maneira consistente em relação aos dados experimentais medidos no ensaio de dinâmica vertical.

A medição da inércia de alguns componentes através da bancada de teste oscilatória foi extremamente importante, levando em conta a necessidade dos parâmetros de inércia na elaboração do modelo e a dificuldade de obtenção de tais parâmetros na literatura.

Considerando que o modelo ainda contém incertezas, principalmente em relação a rigidez e amortecimento de algumas buchas de suspensão e coxins, os demais parâmetros medidos demonstram estar próximos dos valores reais.

Com o estabelecimento de um modelo adequado para o veículo de referência podemos estabelecer novas perspectivas relacionadas principalmente com o estudo da influência da flexibilidade do chassis e da aplicação de procedimentos de otimização sob diversas formas, para a melhoria do comportamento dinâmico e estrutural. O resultado final estabelecerá um conjunto de modificações de projeto, representadas pela alteração de certos componentes e pelo projeto de um novo chassis.

6. AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio financeiro.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, nas pessoas dos professores Dr. Francisco Paulo Lépre Neto, Dr. Valder Steffen Júnior, Dr. Antonio Pedro Clapis, Dr. Marcus A. V. Duarte e Dr. Marcos Morais de Souza.

7. REFERÊNCIAS

- Borges, J.A.F., 1999, “Dinâmica de Veículos Articulados: Simulação Computacional, Otimização e Ensaio Experimentais”; Tese de Doutorado; Universidade Federal de Uberlândia.
- Garrot, W. R.; Monk, M. W. e Chrstos, J. P., 1988, “Vehicle Inertial Parameters – Measured Values and Approximations”, Passenger Car Meeting and Exposition, SAE Technical Paper Series 881767.
- Leal, M. F., Borges, J.A.F., Butkewitsch, S., 2001, “A Case Study on the Response Surface Method Applied to the Optimization of the Dynamical Behavior of Vehicles”, SAE Technical Paper Series No. 2000-01-3850 - X Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, Brasil.
- Leal, M. F., Borges, J.A.F., 2002, “Aspectos da Modelagem Computacional de Veículos Off-road”, Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia.
- Milliken W. F. e Milliken D. L., 1995, “Race Car Vehicle Dynamics”; ISBN 1-56091-526-9.
- Neto, A. C.; Ferraro, L. C.; Veissid, V. L.; Freitas, C. A. M.; Argentino, M. A.; Ripoli, R. R. e Persegum, O. T., 1998, “A Study of Vibrational Behavior of a Medium Sized Truck Considering Frame Flexibility with the use of ADAMS”, International ADAMS User’s Conference.
- Robert, R. R., 2000, “Digital Testing in the Context of Digital Engineering – Functional Virtual Prototyping”, Mechanical Dynamics Inc., Ann Arbor, Michigan, USA.
- Sharp, M., 1999, “Physical or Virtual Testing?”, Testing Tecnology International, October 1999.
- Stevens, G. B., Peterson, D. M. e Eichhorn, U.; 1997; “Optimization of Vehicle Dynamics through Statistically-Designed Experiments on Analytical Vehicle Models”, 12th European ADAMS User’s Conference
- Subramanyam, V., Monkaba, V. e Alexander, T., 2000, “Visteon’s Approach to All-Wheel Drive Vehicle Dynamics Model Simulation and Correlation”; International ADAMS User’s Conference

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL DETERMINATION OF VEHICLE DYNAMIC PARAMETERS

Marcus de Freitas Leal

Federal University of Uberlândia
mfleal@mecanica.ufu.br

José Antônio Ferreira Borges

Federal University of Uberlândia
zeborges@mecanica.ufu.br

Abstract: *Numerical analysis procedures applied to the study of vehicle dynamic, besides reducing the time and the cost associated, make it easier to obtain relevant information about the vehicle regarding different design configurations. In this sense, was proposed the development of a vehicle's project through multibody technique and finite element method. The methodology involves the definition of the: CAD models to a reference vehicle, vertical dynamic behavior through experimental measurements, stiffness properties for springs, tires and bushings. The inertial properties for the chassis, axles, engine and body, are obtained through an apparatus design to operate as a pendulum system. The model analysis are performed regarding different cases, such as track irregularities, velocity, tires pressure and loading. The analysis and comparisons of the results obtained lead to the conclusions and the outline of future research work.*

Keywords: *Vehicle Dynamic, Experimental Verification, Vehicle Design.*