



OTIMIZAÇÃO APLICADA AO COMPORTAMENTO DINÂMICO VERTICAL DE VEÍCULOS USANDO OS PLANEJAMENTOS FATORIAL E LATIN HYPERCUBE SAMPLING

Marcus de Freitas Leal

Embraer – Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A. - Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170 –
São José dos Campos/SP – CEP: 12227-901
marcus.leal@embraer.com.br

José Antônio Ferreira Borges

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia - Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus
Santa Mônica – Bloco 1M – Uberlândia/MG CEP: 38400-902
zeborges@mecanica.ufu.br

Resumo: *O estudo do comportamento dinâmico de veículos tem sido amplamente beneficiado com o uso da simulação computacional, com relação principalmente às possibilidades de análise de modelos numéricos mais complexos e representativos da realidade. Considerando este contexto e a evolução dos métodos de otimização automática aplicados à dinâmica veicular foi proposto o desenvolvimento de uma metodologia que estabeleça as ações e critérios associados ao projeto de um veículo. Para tanto, são utilizadas ferramentas computacionais para modelagem e análise do comportamento dinâmico do veículo, além de vários ensaios experimentais para levantamento de propriedades físicas e parâmetros de validação. Com a finalização do modelo e sua validação experimental, volta-se para a aplicação de técnicas de otimização numérica para promover melhorias em um projeto inicial com a modificação de geometrias como chassis, suspensão e direção. Considerando a tarefa multi-disciplinar de determinar um conjunto de modificações de projeto que represente um ganho em diferentes características de desempenho do veículo, são estudadas técnicas estatísticas de condensação de modelos. Estes modelos representaram cada uma das características dinâmicas importantes no projeto do veículo, permitindo assim a aplicação de técnicas de otimização automática e robustecimento de projetos.*

Palavras-chave: *Otimização numérica, Planejamento de Experimentos, Dinâmica de Veículos*

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 60 tem-se exigido das indústrias aeronáutica e aeroespacial um grande desempenho de seus processos e produtos, impondo a necessidade de otimização e servindo de motivação para novos desenvolvimentos na área. Situações relacionadas à dinâmica passam a ter grande relevância como a modificação das frequências naturais de sistemas evitando ressonâncias, a diminuição da energia de deformação ou peso das estruturas, escolha dos melhores parâmetros de controle, etc.

Atualmente podemos observar um 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 ao auxílio de vários códigos matemáticos desenvolvidos com o objetivo de facilitar a análise dos sistemas dinâmicos.

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) foram fundamentais para a definição de uma metodologia de projeto eficaz sob o ponto de vista dos fabricantes de automóveis.

Do ponto de vista da aplicação da otimização no desenvolvimento de veículos, surgem trabalhos envolvendo o uso de modelos de sistemas multicorpos e modelos de elementos finitos como parte da formulação de diversos problemas de engenharia.

Motoyama et al (2000) aplica o método dos algoritmos genéticos para a otimização de parâmetros associados a uma suspensão do tipo SLA (Short Long Arm) a partir de um modelo multicorpos elaborado em ADAMS. As respostas relativas ao ângulo de convergência, ângulo de câmbio e deslocamento lateral no pneu são otimizadas segundo um conjunto de 20 variáveis de projeto divididas em propriedades geométricas e propriedades de rigidez (nas buchas da suspensão).

Kodiyalam et al (2001) apresenta como foco principal de seu trabalho a aplicação da otimização multi-disciplinar em sistemas veiculares sob os aspectos da segurança, NVH (*Noise Vibration and Harshness*) e peso. Neste estudo, diferentes abordagens de otimização são utilizadas com o intuito de resolver o problema do alto custo computacional, característica do uso de modelos que representam situações de colisão frontal e lateral de veículos.

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 proposta 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 foi implementada.

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 perfis genéricos de pistas utilizando funções densidade espectral de potência.

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 Figura (1) é mostrado o modelo do veículo definido em ambiente virtual.

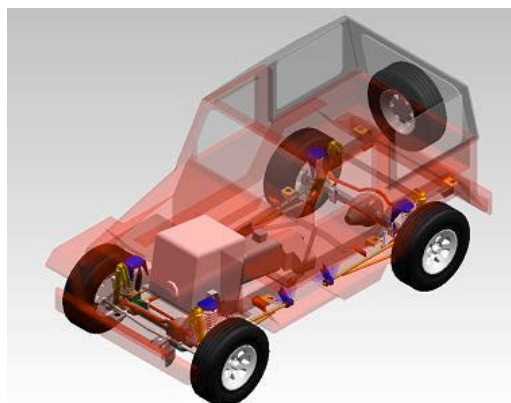


Figura 1 – Modelo CAD do veículo de referência.

3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS

A medição das propriedades de inércia dos componentes se baseia na obtenção dos momentos de inércia de suas partes mais importantes (Garrot et all, 1988). Para isto, foi desenvolvido um dispositivo que consiste em uma plataforma construída com perfis metálicos parafusados e que oscila sobre um eixo metálico maciço apoiado em um par de mancais de rolamento.

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 frequência natural do conjunto bancada/componente é medida experimentalmente através de acelerômetro. A massa do componente e as posições espaciais de seu CG ao longo dos eixos horizontal e vertical são medidas através da pesagem em diferentes condições utilizando uma célula de carga.

O aparato utilizado nos ensaios, conforme ilustrado na Figura (2), consiste além da bancada de medição de inércia, um acelerômetro piezo-resistivo e seu condicionador de sinal, uma fonte de energia, uma placa de aquisição de dados e um notebook.



Figura 2 - Instrumentação usada no ensaio para determinação do momento de inércia.

De forma semelhante à empregada ao eixo mostrado na Figura (2), os componentes mais importantes como a carroceria e o conjunto propulsor tiveram seus momentos de inércia de “pitch” e “roll” medidos.

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; Gillespe, 1992).

Através de um equipamento usado em ensaios de tração/compressão, propriedade da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, foi possível realizar um levantamento do comportamento de certos componentes do veículo de referência.

Na Figura (3) são ilustrados os ensaios realizados no pneu e na mola da suspensão.

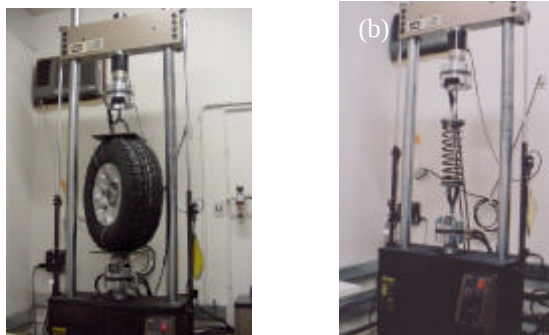


Figura 3 - Ensaio de compressão: (a) Pneu; (b) Mola helicoidal traseira.

4. COMPARAÇÃO ENTRE MODELO COMPUTACIONAL E DADOS EXPERIMENTAIS

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 (Figura 4a). 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).

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.

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.

A partir das propriedades geométricas dos componentes do veículo de referência, foi possível elaborar um modelo multicorpos (Figura 4b) que contou com parâmetros obtidos a partir dos resultados do ensaio experimental para obtenção das propriedades de massa, inércia e posição espacial dos centros de gravidade.

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

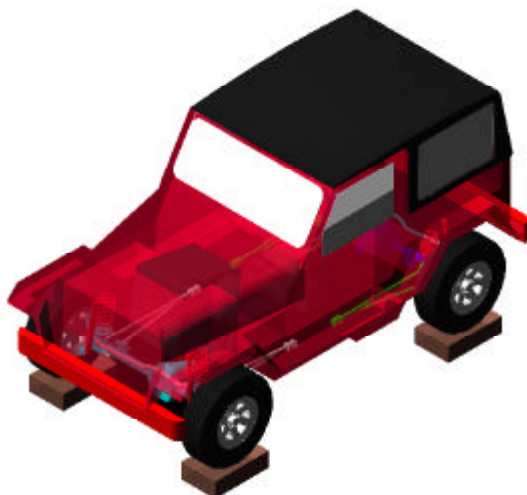


Figura 4 – (a) Simulação do Modelo CAE multicorpos do veículo; (b) Ensaio experimental em pista.

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 2ª marcha) são mostrados nos gráficos das Figuras (5) e (6). Vale lembrar que nos sinais mostrados no domínio do tempo foi aplicado filtro digital passa-baixo em 20 Hz.

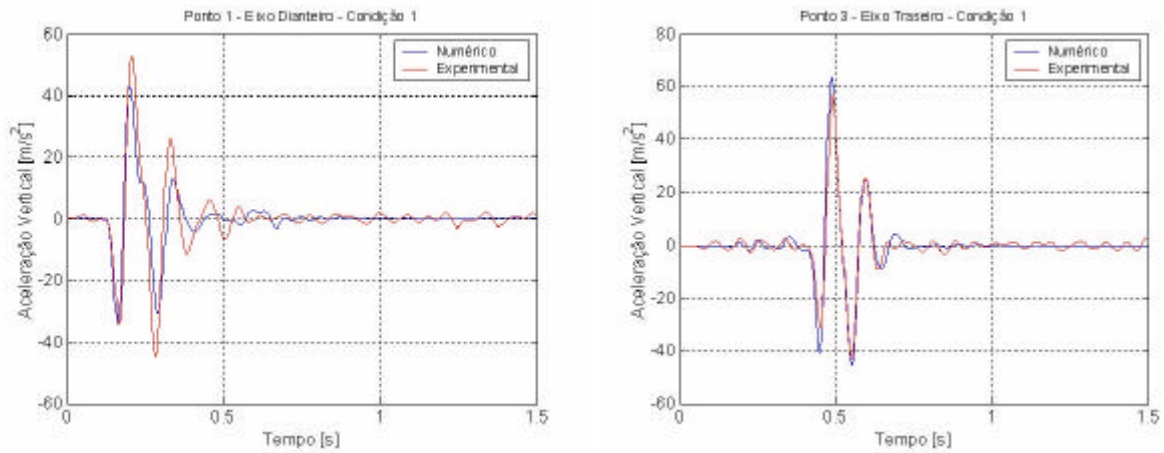


Figura 5 - Comparação entre valores numéricos e experimentais nos eixos.

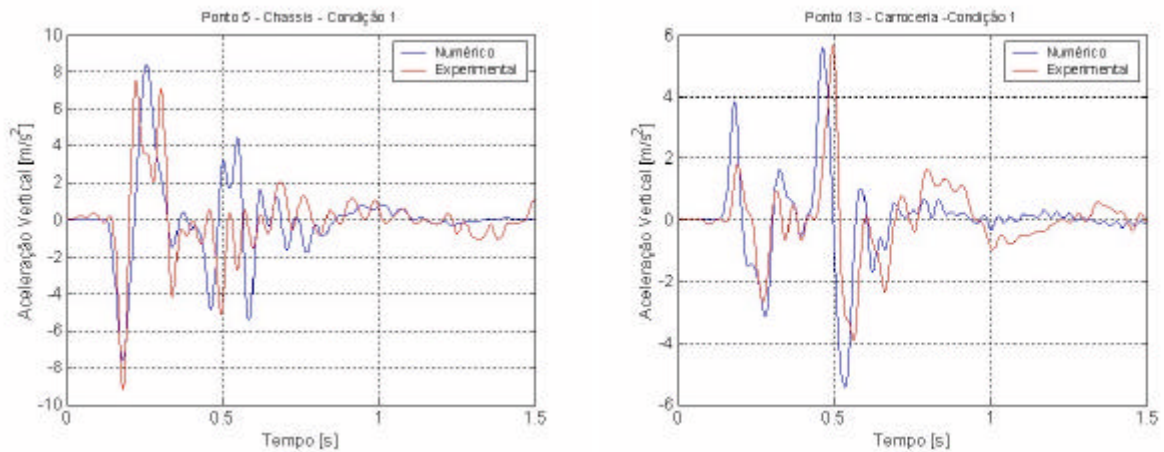


Figura 6 - Comparação entre valores numéricos e experimentais para o chassis e carroceria.

Os sinais mostrados nos gráficos da Figura (5), são mostrados no domínio da frequência nos gráficos da Figura (7) .

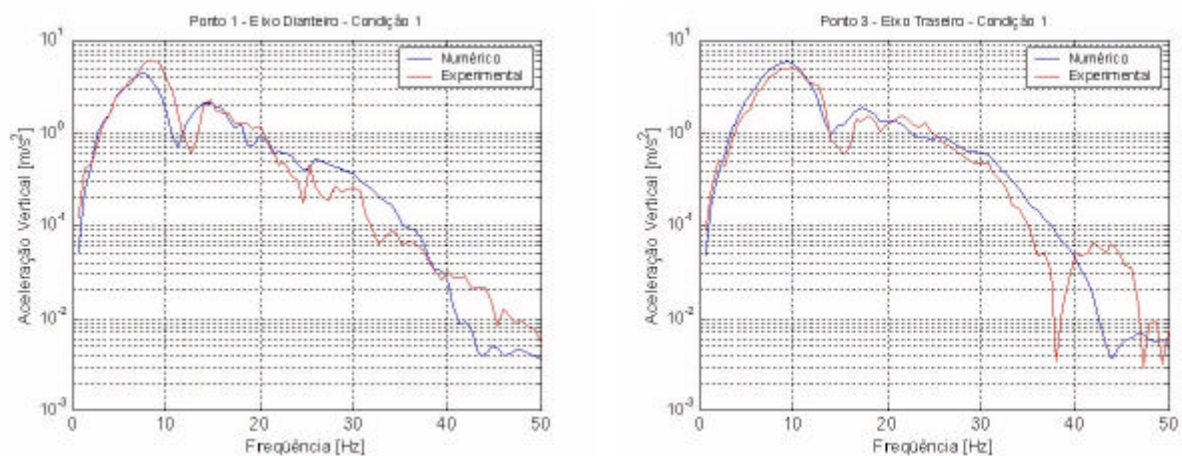


Figura 7 - Comparação no domínio da frequência entre valores numéricos e experimentais nos eixos, conforme condição 1.

5. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

Dado o intenso esforço computacional geralmente associado à simulação de fenômenos não-lineares, o uso de técnicas para a condensação de dados torna-se fundamental em estudos aplicados à otimização do comportamento dinâmico de veículos. Recursos lógicos e matemáticos têm sido então desenvolvidos para contornar este problema e viabilizar o uso das técnicas de otimização.

No sentido de apresentar formulações eficientes, tanto em termos de simulação quanto otimização, diversas metodologias têm sido propostas, sendo uma classe especial baseada em técnicas de aproximação de modelos (Butkewitsch, 1998). De forma geral, estes métodos podem ser descritos como implementações computacionais de atitudes adotadas em ambientes de projeto não automático por engenheiros com experiência e conhecimento sobre o comportamento físico de um dado sistema. Este tipo de abordagem, tentando reproduzir a lógica de raciocínio de seres humanos aptos em determinado ramo da engenharia, tem sua eficiência comprovada na otimização de modelos lineares com reduzido grau de acoplamento multidisciplinar.

À medida que o projeto fica mais complexo, a viabilidade destes métodos passa a ter limitações. Nestes casos, técnicas estatísticas voltadas à condensação de modelos apresentam vantagens importantes em problemas de engenharia (Simpson et al, 1998), conforme mostrado a seguir:

- Condições favoráveis à otimização, associadas à construção de um espaço de projeto numericamente bem condicionado.
- Integração de várias disciplinas de análise num mesmo modelo condensado.
- Fornecimento de uma perspectiva simplificada sobre as relações entre variáveis de projeto e respostas, permitindo rapidez na análise de sensibilidade.
- Ampla redução do esforço computacional, uma vez que os dados referentes ao modelo são reformulados numa representação aproximada.

A aplicação de recursos estatísticos para gerar problemas aproximados envolve um conjunto de técnicas amplamente empregadas para a análise de dados em vários campos da ciência, o planejamento experimental (Schmidt e Case, 1998).

De modo geral, um sistema físico ou processo apresenta uma série de respostas de interesse $\{y\}$ que dependem de um conjunto de fatores $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, sendo que em sua maioria, as relações exatas entre os vetores $\{y\}$ e $\{X\}$ são desconhecidas. Neste caso, é adequado aproximar a relação funcional exata por um modelo empírico aproximado.

Montgomery (1996) apresenta os modelos empíricos como sendo, normalmente, curvas (geralmente polinômios de primeiro ou segundo grau) ajustadas a partir de um conjunto de respostas em função das combinações correspondentes das variáveis de projeto. Neste contexto, cada combinação pode ser entendida como uma amostra pertencente ao espaço de projeto, de forma que arranjos particulares destas amostras obtidas através de um experimento estatisticamente planejado permitem a abstração da relação funcional existente. Por outro lado, a seleção arbitrária de amostras no espaço de projeto tende a resultar numa combinação com alto custo computacional e aproximações falhas. Em um experimento estatisticamente planejado, a amostragem do espaço de projeto é feita dentro de critérios matemáticos, permitindo a obtenção da relação funcional com menor esforço computacional, ou seja, com um número menor de pontos amostrados e com uma determinada confiabilidade.

Welch et al (1992) discute as possibilidades de identificação de variáveis significativas (*Screening*) em um modelo empírico interpolado com pontos amostrados no espaço de projeto de funções matemáticas conhecidas.

Lynn (2000) descreve uma abordagem baseada na utilização conjunta do método da superfície de resposta (*Response Surface Method - RSM*) e da técnica de planejamentos de experimentos (*Design of Experiments - DOE*) para auxiliar a otimização do desempenho de veículos de competição. São elaborados modelos empíricos baseados em simulações de veículos completos em ADAMS, permitindo que a avaliação em tempo-real de parâmetros de influência e suas interações caracterize um acréscimo ao desempenho dinâmico do veículo.

Os autores, levando em conta a contribuição de diversos trabalhos, estabelecem alguns pontos importantes, como a definição do sistema de suspensão depende de uma metodologia correta de seleção de componentes e de uma formulação de otimização adequada que leve ao estabelecimento de uma configuração de projeto equilibrada, levando em conta os vários aspectos da dinâmica de veículos. Entre estes aspectos que concorrem entre si durante a definição dos parâmetros da suspensão podemos citar os seguintes:

- Critérios de conforto – É considerado como um dos critérios mais importantes durante o desenvolvimento de um projeto. A quantificação deste aspecto nem sempre se apresenta sob uma forma padrão e de consenso entre os fabricantes, contudo, observa-se em diversos trabalhos o levantamento de níveis RMS de aceleração na carroceria do veículo no domínio do tempo, distanciamento entre frequências de vibração das massas suspensas e não suspensas, distanciamento de frequências naturais de vibração de componentes das frequências típicas de desconforto para ocupantes e posicionamento de suportes de fixação da carroceria ao chassis em pontos específicos.

- Critérios de aceleração e frenagem – Envolvem principalmente a análise do comportamento da suspensão diante das forças geradas nos pneus durante manobras de aceleração e frenagem. Sendo assim, o projeto do veículo deverá levar em conta os movimentos característicos neste tipo de manobras, quantificando os efeitos de anti-dive, anti-squat e anti-pitch da suspensão. Vale ressaltar que a definição de critérios de frenagem está associada a critérios de segurança veicular importantes, sendo freqüentemente usados como apelo de marketing pelos fabricantes.

- Critérios de estabilidade em curvas – Sob a ação da aceleração lateral durante manobras em curva um veículo experimenta movimento preferencialmente de rolamento da carroceria. Portanto, o novo projeto da suspensão pode ser ajustado para se comportar segundo valores limite para ângulo de rolamento e a taxa de variação deste ângulo levando em conta principalmente parâmetros de barras estabilizadoras e amortecedores.

A formulação de um procedimento de otimização que contemple todos estes critérios é uma tarefa difícil, que envolve a definição de inúmeras variáveis de projeto e funções objetivo. O método da superfície de resposta, juntamente com um planejamento de experimentos adequado pode ser uma alternativa viável para execução deste procedimento de otimização multi-objetivo e multi-disciplinar.

Para tentar responder algumas perguntas associadas ao desempenho de meta-modelos estabelece-se uma metodologia que consiste em submeter o modelo computacional do veículo a dois conjuntos de simulações elaboradas por planejamentos de experimentos bem diferentes no que se diz respeito à forma de amostragem do espaço de projeto.

O primeiro planejamento é o fatorial fracionado a dois níveis, que permite que uma relação funcional linear entre uma resposta e as variáveis independentes seja estimada através da avaliação da resposta em pontos extremos do espaço de projeto definidos nos limites de cada variável. Neste caso, cada uma das n variáveis, ou também chamadas de fatores, podem apresentar apenas dois valores. Uma desvantagem destes planejamentos é o aumento rápido do número de experimentos à medida que o número de variáveis aumenta. Em casos onde o elevado número de experimentos torna a solução do problema inviável é possível estimar a resposta através de modelos aproximados interpolados em pontos específicos do espaço de projeto. Este tipo de abordagem é conhecido como planejamento fatorial fracionado, sendo denotado por $2^{(n-m)}$ onde m é um número inteiro menor que n .

O segundo planejamento é o chamado de Latin Hypercube Sampling, e representa uma amostragem aleatória normalmente distribuída ao longo de cada dimensão do espaço de projeto. Outra característica que o difere do planejamento fatorial é a sua capacidade de preencher todo o espaço de projeto inclusive o interior. Esta característica particular deixa o planejamento mais sensível a erros aleatórios da resposta de interesse, contudo como o experimento tem uma base puramente computacional, tal sensibilidade deixa de ser preocupante. Espera-se desta forma que o experimento LHS possa oferecer algumas vantagens na amostragem de espaços de projeto não lineares e ainda apresentar menor sensibilidade à eliminação de pontos do planejamento que apresentaram respostas de simulações que não convergiram (Outliers).

6. ESTUDO DE CASO – META MODELAGEM

O estudo de caso visa estabelecer a metodologia mais adequada para a simulação do modelo de um veículo assim como a otimização de parâmetros geométricos e físicos que definem o seu comportamento dinâmico. Para isto, várias características do modelo computacional foram parametrizados, como mostrado na tabela (1).

Tabela 1 - Variáveis de projeto e seus intervalos.

	Variáveis de projeto	Limite inferior	Valor inicial	Limite superior
V1	Amortecimento Dianteiro	800 N s/m	1500 N s/m	2200 N s/m
V2	Amortecimento Traseiro	800 N s/m	1500 N s/m	2200 N s/m
V3	Distância entre eixos	-300 mm	0 mm	300 mm
V4	Δ Coord. X da ancoragem do braço longitudinal dianteiro	0 mm	0 mm	300 mm
V5	Δ Coord. X da ancoragem do braço longitudinal traseiro	-300 mm	0 mm	0 mm
V6	Δ Coord. Z da ancoragem do braço longitudinal dianteiro	-100 mm	0 mm	100 mm
V7	Δ Coord. Z da ancoragem do braço longitudinal traseiro	-100 mm	0 mm	100 mm
V8	Rigidez da Mola Dianteira	20 N/mm	25 N/mm	30 N/mm
V9	Rigidez da Mola Traseira	23 N/mm	28 N/mm	32 N/mm
V10	Rigidez da Barra Estabilizadora Dianteira	1.2E5 N/ deg	2.2E5 N/ deg	3.2E5 N/ deg
V11	Rigidez da Barra Estabilizadora Traseira	4.0E4 N/ deg	1.2E5 N/ deg	2.0E5 N/ deg

Um conjunto de respostas de interesse foi definido no modelo de forma a extrair da simulação algumas características dinâmicas do veículo. Entre estas respostas destacam-se as mostradas na tabela (2).

Tabela 2 – Respostas obtidas da simulação do modelo computacional.

Fun01	Valor RMS do deslocamento vertical do CG da carroceria
Fun02	Valor RMS da aceleração vertical do CG da carroceria
Fun03	Valor médio de aceleração para o intervalo de 6 Hz a 8 Hz
Fun04	Valor RMS da aceleração angular em torno do eixo x no CG da carroceria
Fun05	Valor RMS da aceleração angular em torno do eixo y no CG da carroceria
Fun06	Valor médio para o deslocamento angular (pitch) da carroceria
Fun07	Valor médio para o deslocamento angular (roll) da carroceria

Os planejamentos foram gerados de forma a atender alguns critérios de meta-modelagem resultando em dois conjuntos de simulações contendo cada um 128 combinações das variáveis de projeto. Cada combinação foi então submetida a uma simulação dinâmica de tempo igual a 5 s com o modelo representando um veículo trafegando com uma velocidade de 30 km/h em uma pista irregular.

Os resultados das simulações formaram uma base para a elaboração de diversos meta-modelos como exemplificado nas equações (1) e (2), utilizando o planejamento fatorial.

$$\begin{aligned} \text{Fun01} = & 162.8 + 0.5 V1 + 1.0 V2 + 2.0 V3 + 3.9 V4 + 7.8 V5 + 15.6 V6 \\ & + 31.6 V7 - 0.06 V4*V5 + 0.06 V4*V6 + 0.06 V4*V7 + 0.37 V5*V6 + 0.37 V5*V7 \\ & + 0.62 V6*V7 - 0.12 V8*V11 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Fun02} = & 2.0 + 0.08 V2 - 0.29 V3 + 0.06 V4 - 0.15 V5 + 0.22 V6 + 0.24 V7 \\ & + 0.08 V3*V5 - 0.15 V3*V6 - 0.09 V3*V6 - 0.14 V5*V7 \end{aligned} \quad (2)$$

Estabelecendo as demais relações entre as respostas e as combinações de variáveis de projeto têm-se em mãos uma grande capacidade de previsão para características dinâmicas importantes no

projeto de um veículo. Uma formulação para otimização da dinâmica de veículo representa o próximo passo, incluindo superfícies de resposta associadas à dinâmica lateral e longitudinal. Uma otimização levando em consideração todos estes aspectos da dinâmica em um modelo completo seria praticamente inviável do ponto de vista de integração e custo computacional.

7. CONCLUSÕES

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.

Os planejamentos mostraram-se capazes para representar as respostas de interesse, uma vez que a maioria das superfícies de resposta apresentou coeficientes de correlação múltipla ajustado maiores que 90%.

Outra importante conclusão é que se faz necessário à elaboração de um ambiente dedicado capaz de gerenciar automaticamente tanto a geração dos pontos de amostragem como o pós-processamento e otimização. Isto se deve à grande dificuldade de integrar diversos softwares e vários tipos de arquivos em formatos diferentes.

A partir da elaboração de um código que gerencie todas as etapas do processo pode-se integrar os demais aspectos importantes do comportamento dinâmico do veículo durante o desenvolvimento do seu projeto.

8. 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.

9. 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.
- Gillespie, T.D., 1992, “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, SAE Publications Group, ISBN 1-56091-119-9.
- 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 Perseguim, 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 Technology 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

10. DIREITOS AUTORAIS

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

OPTIMIZATION APPLIED TO THE VERTICAL DYNAMICAL BEHAVIOR OF VEHICLES USING FACTORIAL DESIGN AND LATIN HYPERCUBE SAMPLING

Marcus de Freitas Leal

Embraer – Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A.
marcus.leal@embraer.com.br

José Antônio Ferreira Borges

Universidade Federal de Uberlândia
zeborges@mecanica.ufu.br

Abstract: *The dynamical behavior of vehicles has been widely improved through the numerical simulation, mainly related to the several analyses possibilities applied to the complex and representative models. In numerical optimization context and its improvement, the development of a methodology able to define some tasks and criteria associated to the vehicle design was proposed. So that, several modeling and simulation tools, besides experimental tests has been used in order to get physical properties and validation data. Once finished the dynamic model, the optimization techniques are ready to be used in the searching of the best design configuration including chassis, suspension and steering aspects. Taking into account the multi disciplinary task involved in the dynamic features improvement, some meta-modeling techniques were studied. These models represent each one of the important characteristics in vehicle design development, allowing the use of optimization and robust engineering.*

Keywords: *Numerical Optimization, Design of Experiments, Vehicle Dynamics.*