

OTIMIZAÇÃO DISCRETA E CONTÍNUA APLICADA À MELHORIA DE PROJETOS E SISTEMAS AUTOMOTIVOS UTILIZANDO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

G. I. Kotinda, J. A. F. Borges, S. Butkewitsh, M. F. Leal

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2160, Bloco 1M, Uberlândia MG, CEP: 38.400-089.

Palavras chaves: Otimização discreta, Otimização contínua, Superfícies de resposta

RESUMO

No desenvolvimento de um veículo do tipo Mini-Baja, a segurança do piloto deve ser considerada como um dos requisitos de projeto mais importantes. Em primeira instância ela é garantida pelo uso de cinto de segurança de quatro pontos, roupa adequada à competição (macacão, colar cervical, luvas e capacete) e pela estrutura do veículo.

No desenvolvimento da estrutura através do CAE foram utilizadas técnicas de meta-modelagem, otimização e robustecimento visando obter um projeto seguro e competitivo. A principal razão que levou à escolha desta metodologia foi a necessidade de obter uma estrutura resistente e segura, porém o mais leve possível, considerando que o peso total do veículo tem uma grande influência no seu desempenho.

De forma geral, a otimização pode ser entendida como sendo um conjunto de algoritmos matemáticos que operam no sentido de encontrar os extremos de uma função objetivo. Esta função pode ser definida como uma expressão matemática estabelecida de forma a representar as características do veículo que se deseja melhorar (Borges, 1999).

A elaboração do projeto inicial teve como ponto de partida o estudo das normas de segurança da competição, ergonomia do piloto e da posição ocupada pelos principais componentes mecânicos do veículo, de forma a facilitar sua montagem e posterior manutenção.

A partir da configuração inicial foram escolhidas cinco variáveis de projeto para a otimização da estrutura visando a redução da massa e a manutenção das tensões atuantes dentro de limites definidos. Ao mesmo tempo, procura-se evitar vibração excessiva da estrutura promovendo o afastamento entre as suas primeiras frequências naturais e as frequências de excitação provenientes do motor, transmissão e pista. As variáveis escolhidas foram o comprimento do veículo (V1), a sua largura na linha de cintura (V2), a largura do teto (V3), o diâmetro interno (V4) e a espessura do tubo (V5).

Para avaliar o desempenho da estrutura foram selecionadas sete respostas de interesse, sendo elas: massa total da estrutura (R1), energia de deformação (R2), 2^a, 3^a e 4^a frequências naturais (R3, R4, R5), força e torque máximos atuantes (R6, R7). A disponibilidade deste conjunto de informações permite a avaliação do desempenho pois a energia potencial elástica está relacionada à deformação da estrutura, suas frequências naturais indicam a proximidade ou não das frequências de excitação e a redução da massa representa o grande objetivo a ser atingido.

As excitações externas atuando no veículo e usadas como condição de contorno nos modelos de elementos finitos foram calculadas através de simulação de um modelo de veículo Mini Baja utilizando a técnica dos multi corpos (Leal, 2001).

A técnica da meta-modelagem por superfície de resposta consiste em se obter equações matemáticas (meta-modelos) geralmente polinômios lineares ou quadráticas que representem o comportamento físico de um sistema mecânico (massa, forças, tensões, frequências naturais) em um certo espaço de projeto. E estas equações analíticas serão utilizadas como

função objetivo e funções restrição, tornando a otimização rápida economizando assim tempo e custo computacional.

Uma ferramenta para a obtenção dos meta-modelos é o planejamento experimental (Montgomery, 1996). Este consiste na elaboração de uma série de experimentos capazes de amostrar um espaço de projeto de forma racional.

Isto é obtido através da combinação de vários experimentos onde as variáveis de projeto sofrem variação de modo a formar um conjunto de pontos linearmente independentes, reduzindo assim a quantidade de experimentos a serem realizados para obter as superfícies de resposta (meta-modelos).

Inicialmente utiliza-se um planejamento fatorial a 2 níveis (2^k) pois este nos permite determinar quais variáveis de projeto são estatisticamente significativas, ou seja, quais delas efetivamente apresentam influência sobre as respostas de interesse. Através da análise da significância pode-se eliminar algumas das variáveis diminuindo o tempo e o custo computacional nas próximas etapas. Este planejamento também é capaz de fornecer superfícies de respostas lineares que podem ser utilizadas na otimização, se estiverem bem ajustadas.

No projeto do veículo mini-baja, foi utilizado um planejamento fatorial fracionário (2^{k-p}) que é uma simplificação do planejamento fatorial a 2 níveis, que permite reduzir o número de experimentos a serem realizadas. Porém com este planejamento não é possível observar todas as interações entre as variáveis. A Tabela 1 mostra como cada variável (colunas) variam para montar os experimentos (linhas) e fornece as respostas obtidas em cada simulação.

Tabela 1 – Planejamento Experimental e Respostas das Simulações

| Experi- mento | Planejamento Experimental | | | | | Respostas | | | | | | |
|------------------|------------------------------|----|----|----|----|-----------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| | Variáveis | | | | | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 |
| | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 97.704 | 1.550 | 47.139 | 68.540 | 76.025 | 878.300 | 1697.900 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 34.418 | 12.435 | 29.764 | 41.192 | 45.980 | 897.000 | 1781.700 |
| 3 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 54.529 | 2.617 | 41.042 | 68.114 | 73.083 | 974.800 | 1434.200 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 60.856 | 5.150 | 28.377 | 45.664 | 49.172 | 1004.400 | 1485.200 |
| 5 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 54.988 | 2.627 | 49.988 | 67.042 | 73.998 | 931.400 | 1592.400 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 61.369 | 5.560 | 34.991 | 44.780 | 49.788 | 962.300 | 1705.000 |
| 7 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 94.960 | 1.380 | 47.744 | 71.725 | 76.630 | 985.200 | 1395.500 |
| 8 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 33.451 | 9.957 | 30.172 | 43.323 | 46.314 | 976.500 | 1419.500 |
| 9 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 48.811 | 1.213 | 55.845 | 85.868 | 88.659 | 708.500 | 842.100 |
| 10 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 54.475 | 2.399 | 38.566 | 57.914 | 59.499 | 723.200 | 818.400 |
| 11 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 84.113 | .646 | 53.840 | 90.181 | 95.203 | 786.100 | 517.900 |
| 12 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 29.630 | 4.656 | 32.864 | 54.672 | 57.683 | 815.200 | 497.200 |
| 13 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 84.926 | .646 | 66.117 | 88.914 | 93.131 | 704.600 | 980.500 |
| 14 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 29.917 | 4.788 | 41.732 | 53.731 | 56.372 | 731.900 | 1016.700 |
| 15 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 47.218 | 1.221 | 58.034 | 86.126 | 92.718 | 793.600 | 514.100 |
| 16 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 52.697 | 2.375 | 40.062 | 57.934 | 62.279 | 820.200 | 501.700 |

Através da análise da variância (ANOVA), pode-se verificar o grau de ajuste (R_a^2) das superfícies de resposta obtidas pela interpolação das respostas encontradas, equações de 1 a 7. Pode-se notar que os sete meta-modelos explicam adequadamente a variabilidade dos dados amostrados através do planejamento experimental, não sendo necessária a elaboração de superfícies de resposta quadráticas, o que aumentaria o tempo e custo computacional.

$$R1 = 57.7539 + 3.7806 \cdot V1 + 13.1522 \cdot V4 + 16.1336 \cdot V5 \quad R_a^2 = 95,63\% \quad (1)$$

$$R2 = 3.7012 + 1.4582 \cdot V1 - 2.2138 \cdot V4 - 1.2380 \cdot V5 \quad R_a^2 = 71,75\% \quad (2)$$

$$R3 = 43.5172 - 4.8652 \cdot V1 - 2.5878 \cdot V2 + 2.0005 \cdot V3 + 8.9513 \cdot V4 + 1.0873 \cdot V5 \quad R_a^2 = 97,57\% \quad (3)$$

$$R4 = 64.1074 - 7.8099 \cdot V1 + 14.2063 \cdot V4 + 1.5991 \cdot V5 \quad R_a^2 = 98,33\% \quad (4)$$

$$R5 = 68.5334 - 7.1596 \cdot V1 + 15.1475 \cdot V4 + 1.6827 \cdot V5 \quad R_a^2 = 98,40\% \quad (5)$$

$$R6 = 855.8250 + 95.4125 \cdot V1 - 38.6750 \cdot V3 \quad R_a^2 = 96,90\% \quad (6)$$

$$R7 = 1137.5000 + 426.4250 \cdot V1 + 166.8380 \cdot V3 \quad R_a^2 = 96,97\% \quad (7)$$

Para a otimização da estrutura do veículo mini-baja, a equação da energia de deformação foi definida como função objetivo, sendo as demais equações funções de restrição.

O problema de otimização numérica da estrutura foi implementado no software Visual DOC™. Primeiramente foi realizada uma otimização contínua, ou seja, as variáveis de projeto podiam ser variadas de forma contínua do seu limite inferior ao seu limite superior. Como consequência disto, o projeto obtido desta forma implica na fabricação de um tubo não disponível no mercado.

Para sanar este problema foram realizadas uma série de otimizações discretas cujo único valor disponível para o diâmetro interno e espessura fosse de um tubo comercialmente disponível e comparamos os seus resultados, escolhendo o melhor projeto dentre eles. Notamos que o único tubo que passou pela restrição de massa imposta foi o tubo de dimensões mínimas aceitáveis em função das exigências de segurança (diâmetro externo de 1 polegada e espessura de 2.1 mm).

Na tabela 2 são apresentadas as respostas obtidas a partir do projeto inicial, das configurações resultantes dos procedimentos de otimização contínua e otimização discreta.

Tabela 2: Respostas obtidas

| Respostas de Interesse | Projeto Inicial | Otimização Contínua | Otimização Discreta |
|------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| Massa [kg] | 57.7539 | 30.0235 | 27.3182 |
| Energia de Deformação [J] | 3.7012 | 4.7966 | 6.4308 |
| Afastamento da 2ª freq. [hz] | 0.1839 | 1.8523 | 6.7402 |
| Afastamento da 3ª freq. [hz] | 4.1074 | 1.8756 | 7.7403 |
| Afastamento da 4ª freq. [hz] | 8.5334 | 5.0083 | 4.5874 |
| Força [N] | 855.8250 | 736.9431 | 801.6395 |
| Torque [N·m] | 1137.5000 | 812.3185 | 1004.8662 |

Analisando os resultados mostrados na Tabela 2, nota-se que o melhor projeto foi obtido pela otimização discreta, uma vez que apresenta uma menor massa e um maior afastamento entre as frequências naturais da estrutura e aquelas excitadas pelo motor.

Por tudo aquilo que foi mostrado, pode-se concluir que o procedimento de projeto da estrutura resultou em uma configuração que atende às restrições impostas em relação à resistência, aliado a uma massa bastante reduzida (27.3 kg) e utilizando tubo com perfil comercial. Após fabricada o peso da estrutura passou para 30 kg devido ao peso da solda, ignorado na análise de elementos finitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

LEAL, M. F.; 2001; “Otimização do Comportamento Dinâmico de Veículos Usando Superfícies de Resposta”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

BORGES, J.A.F.; 1999; “Dinâmica de Veículos Articulados: Simulação Computacional, Otimização e Ensaio Experimentais”; Tese de Doutorado; Universidade Federal de Uberlândia.

MONTGOMERY, D.C.; 1996; “Design and Analysis of Experiments”; John Wiley & Sons; New York; USA; 672p.