

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE CHASSIS AUTOMOTIVO

Rômulo Rossi Pinto Filho

Universidade Federal de Uberlândia

rrossi@mecanica.ufu.br

Marcus de Freitas Leal

Universidade Federal de Uberlândia

mfleal@mecanica.ufu.br

Jean Carlos Campos Rezende

Universidade Federal de Uberlândia

jccrezende@mecanica.ufu.br

José Antônio Ferreira Borges

Universidade Federal de Uberlândia

zeborges@mecanica.ufu.br

Resumo: Este trabalho consiste na obtenção de uma configuração para a estrutura tipo escada de um veículo de uso misto, com o adequado comportamento dinâmico e estrutural levando em conta os aspectos relativos à viabilidade econômica de uma produção inicial em pequena escala. A metodologia consiste na modelagem matemática de um chassis utilizando como ferramenta o programa comercial ANSYS® baseado no método dos elementos finitos (MEF) e em técnicas de otimização numérica usando o programa GENESIS®. A eficácia desta metodologia está associada à maneira como a técnica é utilizada e às expectativas de quem a utiliza. Foi conduzida uma série de ensaios experimentais com o objetivo de obter parâmetros para a modelagem bem como para realizar a validação dos modelos. Dentre estes ensaios destacam-se os testes de torção e flexão do chassis. Análise modal foi realizada para a determinação das freqüências naturais. Técnicas de otimização numérica foram empregadas ao modelo numérico do chassis na busca de uma configuração ótima levando-se em conta um critério de rigidez torsional. As análises e comparações dos resultados direcionaram a construção do novo chassi permitindo as pesquisas e trabalhos futuros.

Palavras-chave: estrutura veicular, otimização, rigidez torsional

1 INTRODUÇÃO

As estruturas usadas nos veículos atuais de uso misto possuem aparência similar às desenvolvidas há 20 ou 30 anos atrás, e são resultado de uma evolução lenta e estável ao longo dos anos. Os fabricantes destas estruturas veiculares, no passado e alguns ainda hoje, resolvem os seus problemas estruturais iterativamente. Apesar do método iterativo não ser necessariamente o mais eficaz, tem a vantagem de possuir correlação consistente com o mundo real uma vez que os modelos existentes de estruturas de veículos de uso misto atendem às necessidades. Portanto, as estruturas atuais representam um ótimo ponto de partida para a investigação deste trabalho.

A rigidez torsional do chassis afeta significativamente as características de manobrabilidade e dirigibilidade (Milliken, 1995), sendo portanto um importante parâmetro a ser medido.

Muito esforço foi conferido para prever a rigidez torsional de diferentes chassis usando o método dos elementos finitos (Borges, 1999 e Crawford, 1994). Porém, para validar tais modelos é necessário um método experimental que determine diretamente a rigidez torsional. Um teste típico consiste em torcer o chassis pela aplicação gradual de um binário na dianteira enquanto a traseira é mantida fixa (Milliken, 1995).

Neste estudo é apresentado um método para medir a rigidez torsional de um chassis automotivo. Inicialmente foi escolhido um veículo de uso misto comercial líder em competições nacionais e internacionais para o estudo de sua estrutura. O veículo foi desmontado até que seu chassis ficasse exposto e livre para os testes necessários. Numa etapa inicial foram tomadas todas as dimensões da estrutura para sua representação em um modelador sólido. A partir da geometria foi construído o modelo numérico em elementos finitos utilizando para isto o programa ANSYS®.

A rigidez do chassis real foi então medida entre os apoios das molas dianteiras e traseiras. Os valores medidos da rigidez torsional são mostrados bem como o método para se chegar a estes valores é descrito em detalhes.

O método usado para aplicar a torção ao chassis partiu da fixação de sua parte traseira ao mesmo tempo em que um binário foi aplicado em parte anterior. Para a aplicação e controle do binário foi utilizada uma célula de carga juntamente com um atuador hidráulico com capacidade de 2 toneladas e massas metálicas aferidas.

Relógios comparadores foram posicionados ao longo do chassis para que os deslocamentos fossem medidos. A partir das informações dos relógios comparadores, da força medida pela célula de carga e da geometria do chassis, é possível calcular a rigidez torsional da estrutura. Os resultados obtidos são apresentados através de um intervalo de confiança. Os testes conduzidos resultaram em valores de rigidez torsional pouco menores (por volta de 4%) do que o fornecido pelo modelo numérico.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

O chassis em estudo é construído totalmente em aço carbono com longarinas em perfil retangular fechado e travessas tubulares. A geometria do chassis foi medida diretamente na estrutura real utilizando instrumentos de medição tais como transferidor, escalímetro, trena, paquímetro e ultra-som.

A geometria foi representada através de um modelador sólido em não mais que uma dúzia de etapas e encontra-se mostrada na Figura 1.

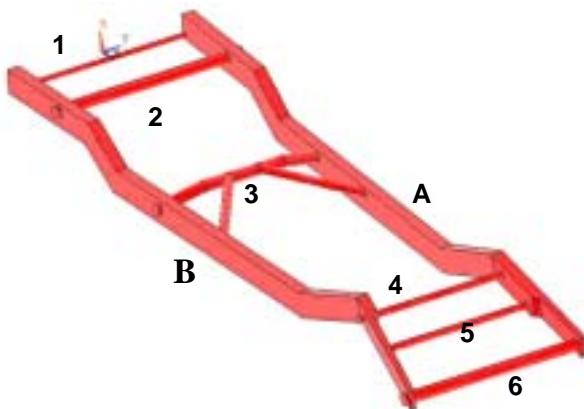


Figura 1: Geometria da estrutura em estudo: longarinas (A, B) e travessas (1, 2, 3, 4, 5, 6).

O número de etapas durante a construção de uma geometria é muito importante pois quanto menores forem estas, mais chances haverá para que a geometria seja limpa. Entende-se por geometria limpa aquela onde não existem vazios internos, onde chanfros, arredondamentos, roscas e detalhes são construídos por último e o mais importante onde estes detalhes não são usados como referência na construção (Adams, 1998) Uma geometria limpa facilita a posterior construção de uma boa malha no programa de elementos finitos.

Elementos do tipo casca com geometria quadrilateral com 30mm de tamanho e espessura 4mm foram usados nas longarinas (A e B). A travessa central em forma de “K” (3) foi modelada com elementos tipo casca com tamanho 15mm forma triangular e espessura de 3mm. As travessas 1, 4, e 5 foram modeladas com elementos tipo casca com espessura de 3 mm, 15 mm de tamanho e forma triangular. As travessas 1 e 6 foram construídas no modelo com elementos de forma quadrilateral com 30mm de tamanho e 3mm de espessura.

O modelo do chassis foi definido com as propriedades do aço carbono. O modelo final está mostrado na Figura 2.



Figura 2: Vista isométrica do modelo em elementos finitos do chassis.

3 MEDIÇÃO DA RIGIDEZ TORSIONAL

Relógios comparadores foram usados para medir as deflexões verticais δ nos lados direito e esquerdo do chassis, ao longo das longarinas ao lado dos suportes de molas dianteiros e traseiros. Para pequenas deformações δ , o ângulo de giro na dianteira é dado pela equação (1):

$$\theta_f = \frac{2\delta}{L_f} \quad (\text{radianos}) \quad (1)$$

onde L_f é a distância lateral entre os relógios comparadores dianteiros. As forças na dianteira direita e esquerda, representadas por F_d e F_e respectivamente são medidas através da célula de carga Kratos como mostrado na figura 3.

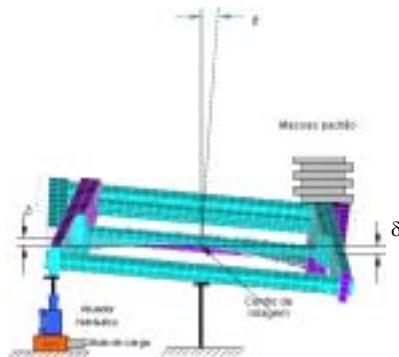


Figura 3: Esquema da montagem experimental

O binário aplicado pode ser calculado através da equação (2)

$$T = \left(\frac{|F_d| + |F_e|}{2} \right) L_s \quad (2)$$

Onde L_s é a distância lateral entre a aplicação das forças.

O ângulo de giro na traseira, θ_t , é calculado a partir dos deslocamentos medidos nas longarinas ao lado dos apoios das molas na traseira.

$$\theta_t = \frac{|\delta_d| + |\delta_e|}{L_t} \quad (\text{radianos}) \quad (3)$$

onde δ_d e δ_e são os deslocamentos verticais da direita e esquerda medidos nas longarinas ao lado dos apoios das molas traseiras e L_t é a distância lateral entre os relógios comparadores.

A rigidez torsional para cada incremento de carga é dada conforme mostra a equação (4)

$$K = \frac{T}{\theta} \quad (4)$$

Onde $\theta = \theta_f - \theta_t$. O binário foi aplicado gradativamente, de forma que 5 pontos são obtidos. A figura 4 ilustra a montagem experimental implementada.

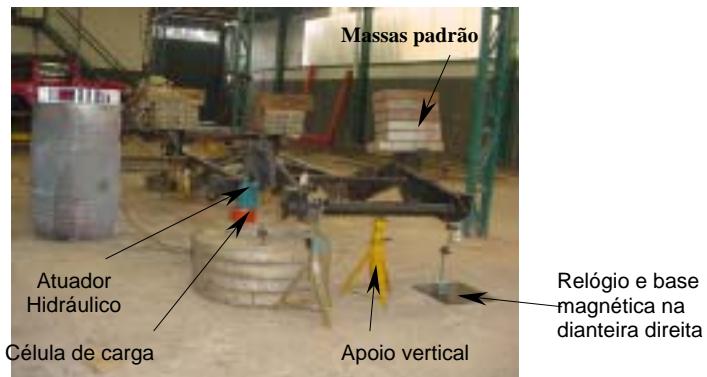


Figura 4: Montagem experimental

De acordo com o mostrado na figura 4, nota-se que foram utilizadas no ensaio 6 massas metálicas calibradas e um atuador hidráulico sobreposto a uma célula de carga. Ao posicionar cada massa sobre o lado esquerdo da estrutura, havia a respectiva aplicação de uma força correspondente a esta massa através do atuador hidráulico e célula de carga no lado direito da mesma, estabelecendo assim o binário desejado.

A parte traseira da estrutura foi apoiada em cavaletes posicionados nas longarinas ao lado dos apoios de molas traseiras. Sua fixação foi garantida pela colocação de um lastro metálico que impôs as condições de contorno desejadas. Na extremidade traseira do chassis, também foram colocados relógios comparadores, conforme mostra a figura 5.



Figura 5: Relógios comparadores instalados na extremidade traseira do chassis.

O incremento foi escolhido de maneira que 6 pontos são obtidos. Foi realizado um total de 10 testes para permitir a construção de uma família de dados.

Em cada um dos 10 testes, o chassi foi torcido em incrementos (total de 6), com os deslocamentos em cada um dos nos quatro relógios comparadores sendo registrados a cada passo. Cada incremento corresponde à colocação de uma massa padrão na esquerda e a respectiva aplicação de uma força correspondente à massa através do atuador hidráulico no lado direito.

Após vários passos, o ângulo de giro é revertido com a remoção das massas padrão uma a uma e liberação do atuador hidráulico respectivamente sempre observando que as forças F_d e F_e sejam iguais em módulo e opostas em direção. Esta volta foi realizada para verificação da existência de histerese.

Cada um dos testes forneceu uma rigidez torsional, os 10 testes portanto, resultaram em uma família dados. Estes dados foram usados para se determinar um intervalo de confiança onde a média se encontra. Trata-se de um procedimento que fornece maior sentido aos dados de interesse. O parâmetro de interesse (rigidez torsional) é estimado com um certo grau de incerteza ou melhor com uma dada confiança (Crawford, 1994). Dessa maneira pode-se melhor visualizar os resultados.

Foi escolhida uma confiança de 95%. Assim pode-se afirmar com 95% de confiança que a verdadeira rigidez do chassi testado encontra-se neste intervalo.

4 ANÁLISE DA RIGIDEZ TORSIONAL DO MODELO NUMÉRICO

Para se avaliar a rigidez torsional do chassi no modelo de elementos finitos, condições de contorno representativas do teste realizado foram aplicadas ao modelo.

As seguintes restrições foram aplicadas ao modelo durante as simulações. A parte traseira teve os deslocamentos U_x U_y e U_z iguais a zero e as rotações θ_x θ_y θ_z livres. Exatamente no centro da travessa 6, na dianteira, U_z igual a zero, conforme a figura 6.

Foram aplicadas forças ao modelo para criação dos torques correspondentes a aplicação das massas na estrutura real.

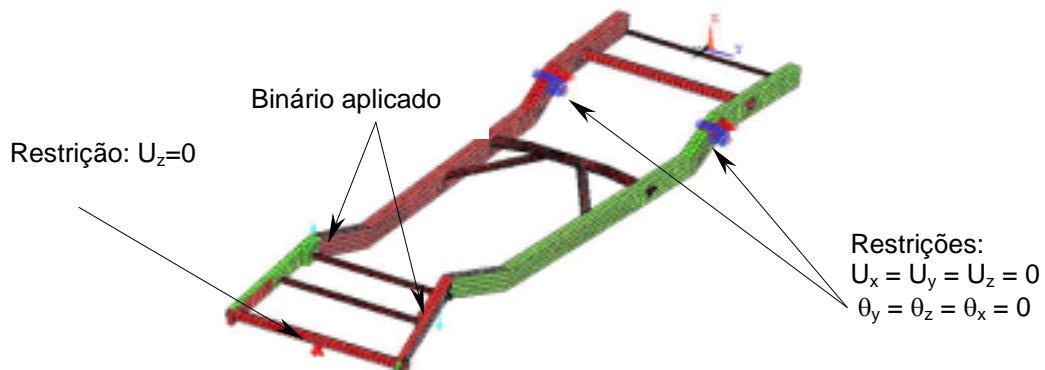


Figura 6.: Condições de contorno e aplicadas ao modelo.

Repetiu-se portanto, no modelo o que foi feito no teste de torção da estrutura real. Ou seja foram aplicados 6 diferentes torques. No modelo o retorno não foi necessário pois a histerese é inexistente. Cada torque foi aplicado no modelo através de um binário composto por forças na direção z com sentidos opostos na altura dos suportes das molas dianteiras do lado do passageiro e do motorista (direito e esquerdo). O binário é aplicado produzindo um torque, $T = F \cdot d$, onde d é a distância lateral entre os pontos de aplicação das forças do lado do passageiro e do motorista formando o binário.

A traseira na posição dos suportes de molas traseiras o chassi teve seus deslocamentos em x, y e z travados ($U_x = U_y = U_z = 0$) e as rotações $\theta_y = \theta_z = \theta_x = 0$. Outros pontos de conexão entre o chassi e a suspensão, conjunto propulsor, acessórios e carroceria não foram travados. Estas condições de contorno são representativas e correspondem a montagem experimental realizada com um chassi real para validação do modelo.

O torque aplicado $T = F \cdot d$, produz um efeito de torção no chassi. As forças com sentidos opostos, provocam deslocamentos no modelo. As na direção vertical (U_z) foram medidas no pós-processador do programa de elementos finitos para construção do gráfico a baixo Figura 9 e validação do modelo.

O modelo em elementos finitos foi reduzido utilizando-se elementos tipo barra construído no software de otimização. O modelo tipo barras foi devidamente validado com a estrutura real usando-se o mesmo procedimento realizado para a validação do modelo de elementos finitos do tipo casca.

A comparação entre os modelos e a estrutura real está mostrada na figura 7.

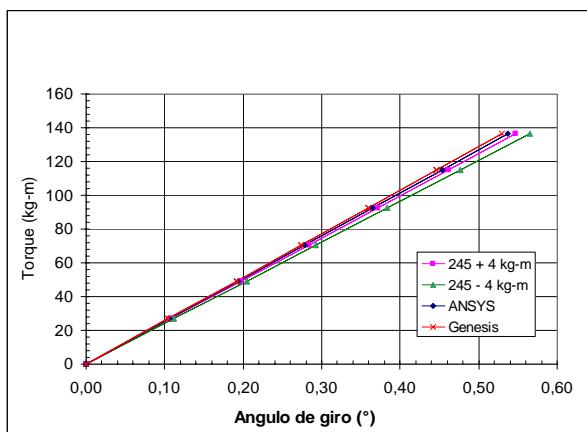


Figura 7: Validação dos modelos em elementos finitos com a estrutura real.

Para os dados apresentados na figura 7 a inclinação é $245 \pm 4 \text{ kg-m}$ ou um erro de 2% (com 95% de confiança). Na verdade, são mostradas duas inclinações: $245 + 4 \text{ kg-m}$ e $245 - 4 \text{ kg-m}$. Portanto as inclinações das retas nas regressões representam não o valor médio da rigidez na faixa de ângulos medidos, mas sim o intervalo onde a média (rigidez torsional) provavelmente se encontra com 95% de confiança. A rigidez torsional encontrada no modelo de elementos finitos é em torno de 4% maior do que a rigidez da estrutura real. (Elementos Finitos $y = 253,55x - 0,0243$ com $R^2 = 1$)

5 OTIMIZAÇÃO DO CHASSI

Otimização pode ser definida como um grupo de técnicas numéricas de programação usadas para se procurar pelo valor ótimo de funções matemáticas. Em outras palavras o propósito da otimização é fornecer ajuda na busca de um projeto que melhor se encaixa às necessidades. Atualmente os algoritmos computacionais analisam um projeto reduzido que o engenheiro

considera representativo do problema real. Parâmetros básicos podem ser alterados e a solução é encontrada. Em outras palavras a experimentação física é substituída pela numérica em um estágio que precede a construção de protótipos. A experimentação, na verdade, não é totalmente eliminada, é simplesmente usada como passo final na validação dos resultados sugeridos pela experimentação numérica ou otimização.

DIFINIÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO – Um problema de otimização com restrições é definido pela função objetivo a ser maximizada ou minimizada:

$$f(X) \quad (5)$$

onde X é o vetor das variáveis de projeto $X=\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$, sujeito a restrições de igualdade,

$$g_j(X) < 0 \quad (6)$$

e de desigualdade,

$$h_j(X) = 0 \quad (7)$$

Para a otimização do chassi foi usado o programa comercial GENESIS®. Durante a otimização uma análise estática foi realizada com a estrutura apoiada em elementos do tipo molas para se representar uma condição próxima a do uso real da estrutura. Forças compondo momentos foram aplicadas aos suportes das molas.

A função objetivo a ser minimizada foi definida como o ângulo de giro entre as seções transversais dos suportes das molas do chassi. Como variáveis de projeto foram perturbadas as posições de 20 nós da estrutura. O problema apresentou mínimos locais que foram contornados pela interferência do engenheiro. Na parte traseira da estrutura a colocação de duas travessas resolveu o problema de mínimos locais. A função objetivo evoluiu conforme a figura 8 e em 18 passos um mínimo global para o problema foi encontrado.

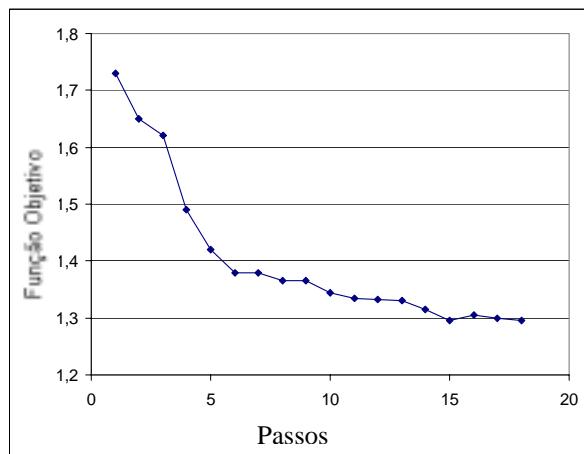


Figura 8: Evolução da função objetivo.

A estrutura após a otimização ficou como mostrada na figura 9.

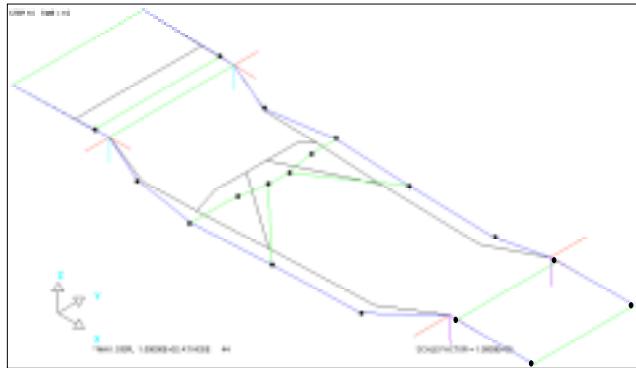


Figura 9: Estrutura otimizada comparada com o projeto inicial.

6 RESULTADOS

A nova estrutura encontrada pelo algoritmo de otimização foi torcida e sua rigidez torsional encontrada e comparada com a da estrutura original. A figura 10 mostra a comparação:

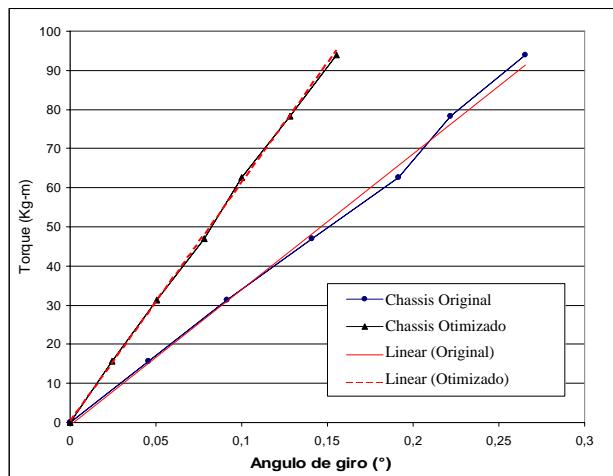


Figura 10: Comparação entre a rigidez da estrutura otimizada e da original.

A estrutura otimizada apresentou rigidez torsional 75% superior que a da original. A figura 11 mostra a nova estrutura já na sua forma geométrica sólida.

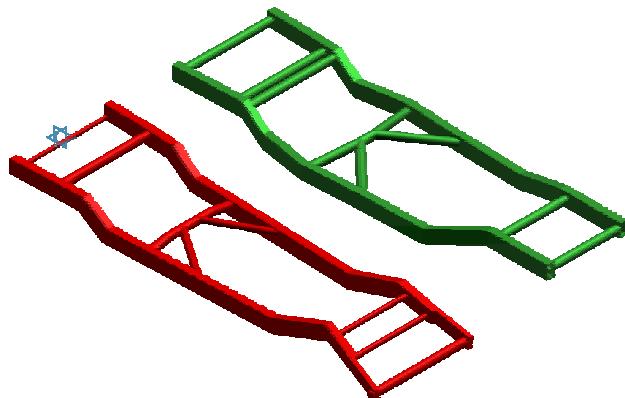


Figura 11: Estruturas original e otimizada.

A estrutura otimizada apresentou aumento de massa de apenas 5 kg em seu peso total. As posições de x e y do centro de gravidade na nova estrutura variaram em torno de 1%.

7 CONCLUSÕES

A rigidez torsional de um chassi de um veículo comercial fora de estrada foi medida diretamente através de um procedimento experimental.

Os dados experimentais foram usados para se validar modelos em elementos finitos representativos da estrutura real. Os modelos numéricos apresentaram rigidez 4% maior que o chassi real. Este fato se deve à perfeição dos modelos e à imperfeição da estrutura real. Por exemplo, no modelo numérico as soldas são perfeitas, mas na realidade podem possuir defeitos que leva a uma rigidez estrutural menor.

Os modelos em elementos finitos devidamente validados permitiram modificações virtuais que influenciaram na rigidez torsional da estrutura.

A otimização da estrutura foi realizada. Como parâmetros foram buscados o aumento da rigidez estrutural, a manutenção do centro de gravidade e o peso total da estrutura. Paralelamente foi buscada uma geometria mais simples que facilitasse de produção.

A estrutura otimizada apresentou aumento de 75% na rigidez torsional, variação de 1% nas posições x e y do centro de gravidade e aumento de apenas 5 kg em sua massa. A frente da estrutura apresentou uma geometria simples que facilitará sua construção.

8 TRABALHOS FUTUROS

A construção da estrutura otimizada está em fase final de construção.

Assim que estiver concluída esta será testada para se obter a rigidez torsional real.

Em seguida, os suportes da suspensão, motor e carroceria serão construídos e soldados ao novo chassi para a montagem do veículo.

9 REFERÊNCIAS

- Milliken W.F. e Milliken D. L., 1995, “Race car Vehicle Dynamics”, SAE International.
Borges J. F., 1999, “Dinâmica de veículos articulados: Simulação Computacional, Otimização e Ensaios Experimentais”, Tese de Mestrado, UFU.
Crawford J., 1994, “Finite Element Analysis of a NASCAR Winston Cup Stock Car”, SAE Paper N° 942527, SAE Motorsports Engineering Conference, Detroit, MI.
Bendat J. S. e A. C. Piersol, 1986, “Random Data”, John Willey and Sons, New York, NY.
Adams V., 1998, “Building Better Products with finite element analisys”, OnWord Press, USA.
Vanderpaats G.N, 1984; “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design”; McGraw-Hill Book Company; USA; 332 p.

10 DIREITOS AUTORAIS

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

AUTOMOTIVE FRAME PROTOTYPE ANALYSIS AND OPTIMIZATION

Rômulo Rossi Pinto Filho

Universidade Federal de Uberlândia
rrossi@mecanica.ufu.br

Marcus de Freitas Leal

Universidade Federal de Uberlândia
mfleal@mecanica.ufu.br

Jean Carlos Campos Rezende

Universidade Federal de Uberlândia
jcerezende@mecanica.ufu.br

José Antônio Ferreira Borges

Universidade Federal de Uberlândia
zeborges@mecanica.ufu.br

Abstract: This work consists in obtaining a ladder frame configuration for an all terrain vehicle with the adequate structural and dynamic behavior, regarding a small-scale production economical viability. The methodology consists in building the frame numerical models, using finite element method (FEM) with ANSYS® software and numerical optimization techniques with GENESIS® software. The efficiency of this methodology is associated to the way it is used and to the user's expectations. Experimental tests were performed for model validation including real frame torsion and bending tests. Modal analysis was accomplished to determining the natural frequencies. Continuous optimization technique was applied to the numerical model in order to obtain a better design regarding the torsional stiffness criterion. The analysis and comparisons of the results obtained lead to the new frame building and will outline the future research work.

Keywords: vehicular frame, optimization, torsional stiffness