



ESTUDO DE UMA ESTRUTURA VEICULAR

Rômulo Rossi Pinto Filho

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
rossi@mecanica.ufu.br

José Antônio Ferreira Borges

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
zeborges@mecanica.ufu.br

Resumo: *Este trabalho consiste na obtenção de uma configuração de uma estrutura para 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 basicamente na modelagem matemática de um chassis utilizando como ferramenta o programa comercial ANSYS baseado no método dos elementos finitos (MEF). Vale ressaltar que a eficácia do MEF associada ao projeto de estruturas depende da maneira como a técnica é utilizada e das expectativas de quem o utiliza. Todos os usuários desta ferramenta de análise devem ter em mente as capacidades e limitações do método para que as expectativas sejam criadas de maneira correta. Os modelos computacionais foram elaborados usando abordagens que levam em conta diferentes tipos de elementos (sólidos e barras). 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 e ensaios de análise modal. Desta forma, os modelos computacionais devidamente validados permitirão a otimização futura da estrutura.*

Palavras-chave: estrutura veicular, otimização, rigidez torcional

1. INTRODUÇÃO

As estruturas usadas nos veículos de uso misto atuais 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. As estruturas atuais são portanto um ótimo ponto de partida para a investigação deste trabalho.

A rigidez torcional do chassi de um veículo afeta significativamente as características de manobrabilidade e dirigibilidade (handling) [1] é portanto um importante parâmetro a ser medido.

Muito esforço foi conferido para se prever a rigidez torcional de diferentes chassis usando o método dos elementos finitos [2,3]. Para se validar tais modelos de elementos finitos um método experimental é necessário para medir diretamente a rigidez torcional. Um teste típico consiste em torcer o chassi adicionando-se um binário gradualmente na dianteira mantendo-se a traseira fixa [1].

Para este estudo, um método para se medir a rigidez torcional de um chassi é apresentado. 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 sua estrutura ficasse exposta e livre para os testes necessários. Primeiramente tomou-se todas as dimensões da estrutura para sua construção em um modelador sólido. A partir da geometria construiu-se o modelo numérico utilizando-se o método dos elementos finitos.

O modelo do chassi foi construído usando-se o programa ANSYS. Todo o trabalho computacional foi realizado usando-se um computador pessoal com processador AMD Athlon™ de 900 MHz e 512 Mb de memória RAM.

A rigidez do chassi real foi então medida entre os apoios das molas dianteiro e traseiros usando-se o método apresentado para validação do modelo. A estrutura foi fixada na parte posterior junto aos suportes de molas traseiras e torcido na dianteira com o auxílio de massas padrão e um atuador hidráulico. Uma vez que o chassi é sustentado pelas molas quando montado na suspensão, os suportes das molas são um local razoável para se torcer a estrutura. Os valores medidos da rigidez torcional são mostrados bem como o método para se chegar a estes valores é descrito em detalhes.

O método usado para se torcer o chassi foi se fixar a parte posterior e ao mesmo tempo aplicando-se um momento devido a um binário na parte anterior. Foi utilizada uma célula de carga juntamente com um atuador hidráulico com capacidade de 2 toneladas em um dos lados para se aplicar uma das componentes do binário e no outro lado foram utilizadas massas conhecidas para se aplicar a outra componente do binário.

Relógios comparadores foram posicionados ao longo do chassi para que os deslocamentos fossem medidos. Usando-se as indicações dos relógios comparadores, a força medida pela célula de carga e a geometria do chassi, a rigidez torcional pode ser calculada. O chassi foi devidamente fixado para minimizar restrições não desejadas. Os dados são apresentados através de um intervalo de confiança. Os testes conduzidos resultaram em valores de rigidez torcional pouco menores (por volta de 4%) do que o modelo numérico, o que é esperado.

A diferença entre os valores está dentro do esperado devido às incertezas das constantes de material, geometria, medições dos relógios comparadores e as simplificações assumidas no modelo numérico bem como perfeição do modelo e imperfeição da estrutura real.

2. DESCRIÇÃO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

O chassi em estudo é construído de aço carbono com longarinas em perfil retangular fechado com travessas em aço com seção tubular. A geometria do chassi foi medida diretamente em uma estrutura real de um veículo de uso misto comercial. Foram utilizados instrumentos de medição tais como transferidor, escalímetro, trena, paquímetro e ultra-som.

A geometria foi construída em um modelador sólido em não mais que uma dúzia de etapas e está mostrada na Figura 1.

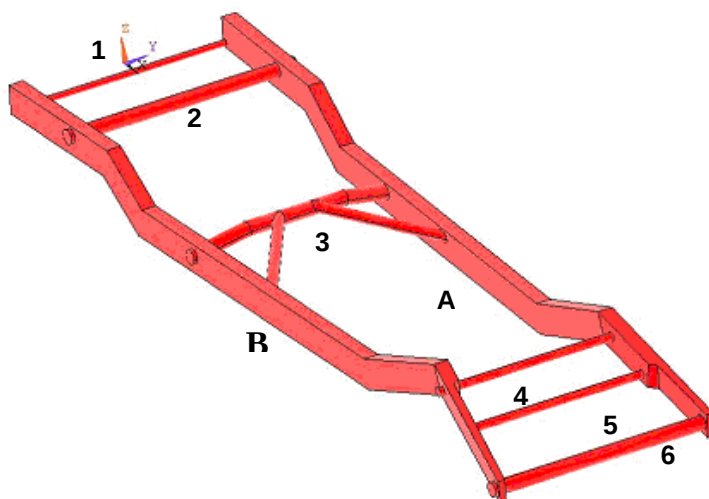


Figura 1: Geometria da estrutura em estudo, mostrando as longarinas em perfil retangular fechado (A, B) com travessas tubulares (1, 2, 3, 4, 5, 6).

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, rosca e detalhes são construídos por último e o mais importante onde estes detalhes não são usados como referência na construção [5]. Uma geometria limpa, facilita a 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 chassi foi construído com as propriedades do aço carbono. listadas abaixo:

- Módulo de Elasticidade $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
- Número de Poisson 0,3
- Densidade 7830 kg/m^3

O modelo construído está mostrado na Figura 2.

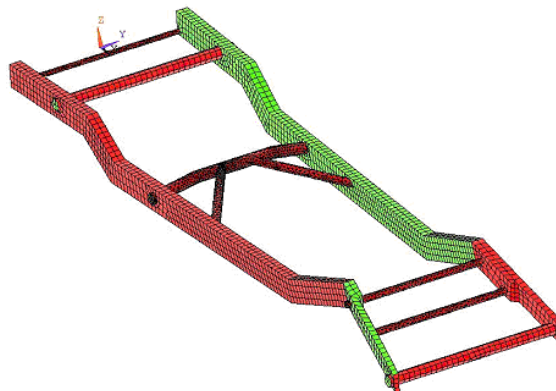


Figura 2: Vista isométrica do modelo em elementos finitos do chassi.

As seguintes considerações foram feitas durante a construção do modelo:

A geometria foi medida com precisão de 4mm;

As espessuras foram medidas com precisão de 0.2mm;

Todos os suportes foram excluídos do modelo;

As conexões entre as longarinas e travessas são consideradas perfeitas. Esta consideração representa de forma correta as junções soldadas. Porém onde as soldas não são perfeitas estas considerações podem levar a um modelo com junções mais rígidas do que o sistema real;

O material é considerado isotrópico dentro de sua faixa linear elástica, os cálculos foram feitos através de uma análise linear estática com pequenas deformações resultando em rigidez torcional constante.

Para se validar o modelo em elementos finitos um método experimental é necessário para medir diretamente a rigidez torcional. O método permite usar os dados para validar modelos em elementos finitos.

3. MEDIÇÃO DA RIGIDEZ TORCIONAL

Medições de um chassi real completo podem ser utilizadas para validação do modelo de elementos finitos além de ilustrar as incertezas no projeto.

Para se medir diretamente a rigidez torcional de um chassi de veículo de uso misto um procedimento experimental foi realizado. O veículo foi desmontado até que sua estrutura ficasse livre dos componentes da suspensão e carroceria para permitir os testes.

Relógios comparadores foram usados para medir as deflexões verticais δ nos lados direito e esquerdo do chassi, das longarinas ao lado dos suportes de molas dianteiros e traseiros. Para pequenas deformações δ , o ângulo de giro na frente é:

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

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 4.

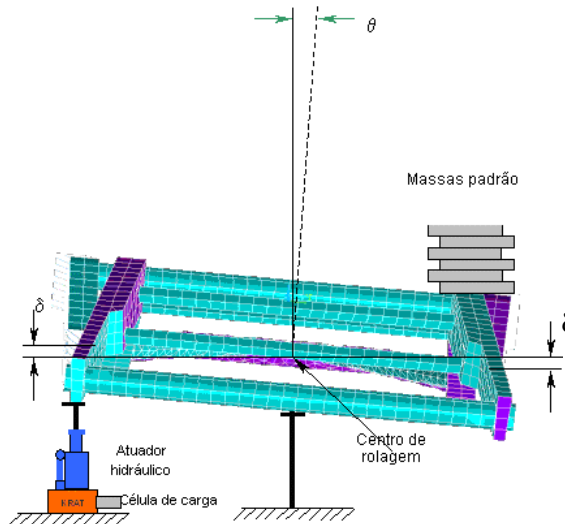


Figura 4: Esquema da montagem experimental

O Torque é calculado a partir de:

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

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 (através de relógios comparadores) nas longarinas ao lado dos apoios das molas traseiras e L_t é a distância lateral entre os relógios comparadores de trás.

A rigidez torcional de cada incremento é calculada através de

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

Onde $\theta = \theta_f - \theta_t$. O incremento foi escolhido de maneira que 5 pontos são obtidos.

O chassi foi torcido em incrementos, com os dados de deslocamento na dianteira direita e esquerda e traseira direita e esquerda sendo registrados a cada passo figura 5.

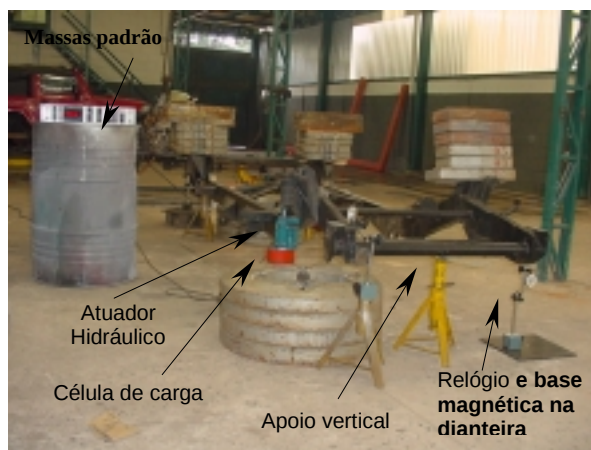


Figura 5: Montagem experimental

Foram usadas 6 massas padrão, todas foram pesadas na mesma célula de carga utilizada para medir a força aplicada com o atuador hidráulico.

A cada massa colocada na estrutura no lado direito, havia a respectiva aplicação de uma força correspondente a esta massa através do atuador hidráulico e célula de carga no lado esquerdo da estrutura. Assim as massas correspondiam a parte do binário na direção para baixo e a força do atuador hidráulico à parte do binário na direção para cima figura 6.

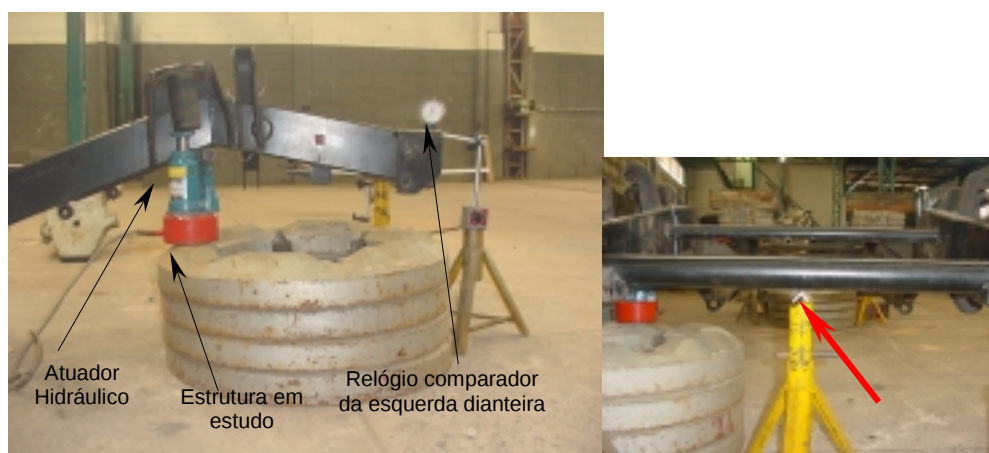


Figura 6: Detalhe do acionamento hidráulico e apoio na dianteira

O centro da travessa dianteira (6) da estrutura foi apoiada em uma cantoneira de forma a aproximar um apoio pontual (figura 6).

Abaixo do atuador hidráulico se encontrava a célula de carga Kratos assim foi possível se aplicar exatamente a mesma força (com sentido oposto) no lado esquerdo que correspondia a colocação de uma massa padrão no lado direito. Assim o binário ficou equilibrado garantindo que o centro de rolagem se estabelecesse no centro da estrutura.

A traseira da estrutura foi apoiada em cavaletes posicionados nas longarinas ao lado dos apoios de molas traseiras. Pesos foram colocados sobre a estrutura na altura dos cavaletes na direita e na esquerda, pesos estes que somavam um total que correspondia a reações verticais maiores do que o binário aplicado na dianteira. Assim conseguiu-se na traseira as condições de contorno desejadas.

As forças verticais foram, dessa maneira anuladas e a resultante das forças na estrutura foi o binário aplicado na dianteira.

Na traseira também foram colocados relógios comparadores na direita e na esquerda para se determinar o ângulo de giro da traseira figura 7:



Figura 7: Relógios instalados na traseira

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 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.

Uma regressão do tipo linear é feita no conjunto de dados de cada teste onde o ângulo de giro é a variável dependente (x) e o torque é a variável (y) independente. O primeiro ponto é assumido como zero para giro e zero para o torque (chassi não empenado).

Cada um dos 10 testes gerou uma curva como a da figura 8.

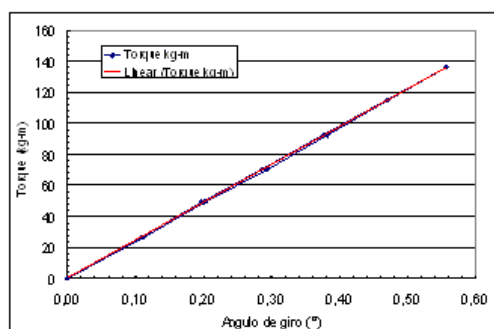


Figura 8: Exemplo de curva para cada um dos testes

Existe histerese nos dados, que se deve possivelmente devido a atrito. A histerese é mínima. Cada um dos testes forneceu uma rigidez torcional, os 10 testes portanto, resultaram em uma família de dados. Estes dados são 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 torcional) é estimado com um certo grau de incerteza ou melhor com uma dada confiança [4]. 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.

Os resultados para torque versus ângulo de giro relativo para o chassi completo são mostrados na figura 9.

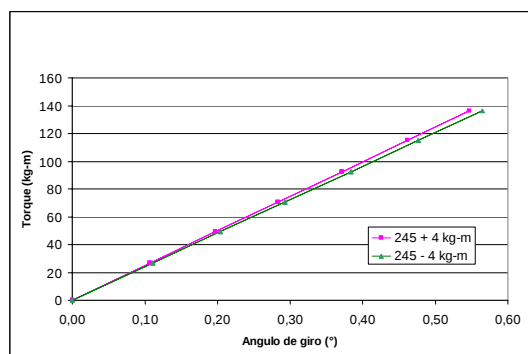


Figura 9: Torque versus ângulo de giro relativo

Para os dados apresentados na figura 9 a inclinação é 245 ± 4 kg-m ou um erro de 2% (com 95% de confiança). Na verdade, são mostradas duas inclinações: $245 + 4$ kg-m e $245 - 4$ 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 torcional) provavelmente se encontra com 95% de confiança.

4. ANÁLISE DA RIGIDEZ TORCIONAL DO MODELO NUMÉRICO

Para se avaliar a rigidez torcional 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 e θ_z livres. E exatamente no centro da travessa 6, na dianteira, U_z igual a zero, conforme a figura 10.

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

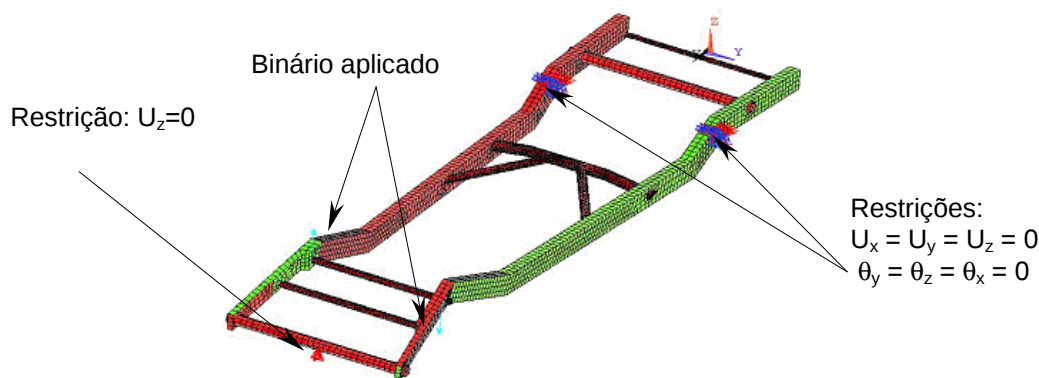


Figura 10.: Condições de contorno e aplicadas ao modelo.

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 12 e validação do modelo.

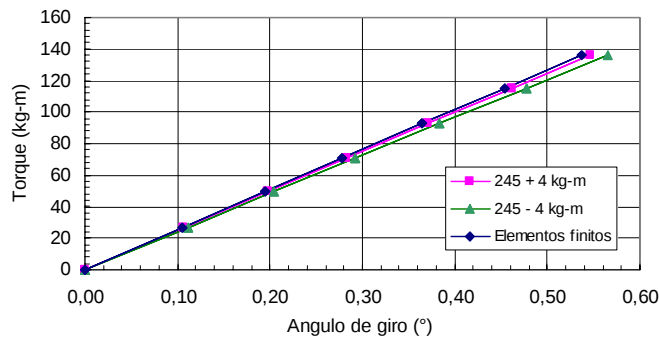


Figura 12: Comparação da rigidez torcional do modelo com a real.

A figura acima indica que os resultados preditos no modelo de elementos finitos são consistentes com os medidos na estrutura real.

A rigidez torcional 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. CONCLUSÕES

Foi construído um modelo em elementos finitos a partir da geometria de uma estrutura real de um veículo de uso misto de ótimo desempenho. A rigidez torcional de um chassi de veículo de uso misto foi medida diretamente através de um procedimento experimental. Os dados da medição foram usados para se validar o modelo em elementos finitos. O modelo numérico apresentou rigidez em torno de 4% maior que a da estrutura real.

Este fato deve-se devido à perfeição do modelo e a imperfeição da estrutura real. Por exemplo, no modelo numérico as soldas são perfeitas, já na realidade estas podem possuir defeitos que levam a uma menor rigidez estrutural. O modelo validado permite modificações virtuais ao projeto e suas respectivas influências na rigidez torcional da estrutura. Como continuação deste trabalho, uma otimização da estrutura será realizada. Como parâmetros pode-se visar o aumento na rigidez estrutural, redução da altura do centro de gravidade e manutenção peso total da estrutura.

Pode-se também buscar no projeto ótimo além da rigidez torcional, uma geometria mais simples para redução de custos na fabricação.

6. REFERÊNCIAS

1. W.F. Milliken e D. L. Milliken, Race car Vehicle Dynamics, SAE International, Warrendale, PA, 1995.
2. BORGES, J. F., Dinâmica de veículos articulados: Simulação Computacional, Otimização e Ensaio Experimentais, Tese de Mestrado, UFU, 1999
3. John Crawford, "Finite Element Analysis of a NASCAR Winston Cup Stock Car", SAE Paper N° 942527, SAE Motorsports Engineering Conference, Detroit, MI, 1994
4. J. S. Bendat e A. C. Piersol, Random Data, John Willey and Sons, New York, NY, 1986.

5. ADAMS, V.: “Building Better Products with finite element analysis”, OnWord Press, USA, 1998.
6. VANDERPLAATS, G.N.: 1984; “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design”; McGraw-Hill Book Company; USA; 332 p.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

AUTOMOTIVE FRAME OPTIMIZATION

Rômulo Rossi Pinto Filho

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
rrossi@mecanica.ufu.br

José Antônio Ferreira Borges

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
zeborges@mecanica.ufu.br

Abstract: *This work consists in obtaining a frame configuration for an all terrain vehicle with the adequate dynamic and structural behavior, taking into account the economical viability aspects regarding an initial small production. The methodology consists of modeling a frame used by a vehicle, using as tool the commercial software (ANSYS) based on the finite element method (FEM). The efficiency of this method in modeling structures and parts is associated to the way it is used and to the user's expectations. All users of this technique must have in mind the capabilities and limitations of the method so the expectations can be created accordingly. The numerical models were created using a different approach solid and beam elements in the same structure. A series of experimental tests were performed for model validation. Frame torsion and bending tests were performed as well as the modal analysis and inertia measurements. Discrete and continuous optimization techniques were applied to the numerical model with multi-objective functions in order to obtain a better design regarding the frame established criteria. The analysis and comparisons of the results obtained lead to the conclusions and the outline of future research work.*

Keywords: *vehicular frame, optimization, torsional stiffness*