



XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP
Artigo CREEM2012

ANÁLISE ESTRUTURAL E MODAL DE UM CHASSI DE REBOQUE

Israel Antonio Macedo de Lima e Carla T. M. Anflor

Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Engenharia Automotiva
Área Especial de Indústria Projeção A-UnB, Setor Leste, 72.444-240, Gama-DF, Brasil
E-mail para correspondência: Israel.macedo1@gmail.com

Introdução

Logo após o advento da roda, o ser humano foi capaz de adaptar duas rodas ligadas por eixo e uma madeira na parte posterior dando origem aos primeiros reboques. Após vários séculos de aprimoramentos os reboques foram evoluindo, passando de um mero meio de transporte de cargas simples como grãos, objetos para construção, para modernas charretes de tração animal para transporte de pessoas.

Da mesma forma que a evolução dos automóveis foi acontecendo, tanto no contexto do *design* como nas implementações mecânicas os reboques também seguiram essa evolução. Um exemplo bem claro dessa expressiva mudança são as antigas carroças que deram origem aos luxuosos *motor homes*, sendo muito utilizado desde por equipes de automobilismo até pessoas em viagens de lazer e trabalho em seus deslocamentos rodoviários.

A estrutura do Chassi de um reboque geralmente segue um modelo clássico, um cambão em “V” que é engatado ao veículo de tração. Esse cambão é conectado as longarinas laterais que delimitam a largura do veículo. As geometrias seguintes são delimitadas pelo fabricante, e principalmente dependendo da sua finalidade. As longarinas são unidas por travessas espaçadas. Na estrutura usa se o perfil C dobrado ou tubos quadrados que variam com a capacidade de carga. A suspensão é composta por um eixo rígido ligado a um sistema de feixe de molas e amortecedores.

Conforme apresentado na RESOLUÇÃO Nº 63, DE 21 DE MAIO DE 1998 veículos com o peso bruto total maiores que 500 Kg devem conter as seguintes peças novas: pontas de eixo; cubos de rodas; rolamentos; amortecedores; sistema completo de freio; sistema elétrico e de iluminação; sistema de engate normalizado e pneus.

Segundo Grison (2005) materiais técnicos a respeito de veículos de transporte de cargas leves são escassos, por que para esse tipo de produção não existe manufatura em larga escala. No Brasil são raras as empresas que fabricam estes veículos com a inspeção de um engenheiro, principalmente pela falta de fiscalização dos órgãos responsáveis.

Pequenas fábricas que manufaturam este tipo de implemento rodoviário, não estão se preocupando com uma metodologia de desenvolvimento estrutural desses veículos, o peso do produto não é uma prioridade no momento da fabricação. Baseado em experiências, testes experimentais e problemas estruturais anteriores as estruturas consequentemente apresentam um superdimensionamento e um peso muito elevado (Peres, 2006).

No Brasil o transporte rodoviário de cargas leves ou pesadas é bastante explorado, chegando a cerca de 60% do total. Em algumas ocasiões esse tipo de transporte não é o mais favorável, mas por uma série de fatores, essa modalidade é extensivamente utilizada no país (Hougaz, 2005).

Segundo Nascimento (2009), existe uma acirrada concorrência do mercado consumidor em virtude principalmente da globalização, os fabricantes desse tipo de produto necessitam rever seus conceitos de projeto. Além de veículos mais leves, o mercado passou a exigir qualidade e durabilidade dos produtos.

Objetivo

No desenvolvimento de um veículo estão envolvidas inúmeras avaliações complexas, tais como, análises dos materiais envolvidos, gestão da produção, análises estruturais e análise modal e dinâmica, entre outros. Obviamente todos estas considerações são realizadas para veículos produzidos em larga escala onde o lucro justifique o investimento. Geralmente reboques não são construídos em larga escala, quando comparado a um automóvel produzido pela indústria automobilística, sendo assim, projetos referentes a reboques são simples e muitas vezes sem nenhuma ferramenta de engenharia. É neste contexto que se insere este trabalho, o qual consiste na avaliação de um modelo existente e na proposta de melhoria do projeto considerando as técnicas de engenharia.

Com o objetivo de aumentar a competitividade do produto, será realizadas uma análise modal e estática da estrutura do chassi, a fim de verificar se existe a viabilidade de aprimoramento do projeto já existente do ponto de vista da engenharia. Como se trata na maioria das vezes de veículos que transportam uma carga relativamente baixa, a maioria das empresas utiliza de forma empírica um coeficiente de segurança bastante elevado na fabricação, o que gera um superdimensionamento da estrutura (Grison, 2005). Na fabricação desses reboques geralmente a demanda não é muito alta, porém, o custo de manufatura é elevado o que torna a margem de lucro reduzida. Nesse contexto o foco principal do trabalho é o projeto de um reboque tracionado por um veículo automotor capaz de transportar um veículo de passeio. Em fase embrionária o projeto mostrará a duas importantes análises estruturais, análise modal e a análise estática utilizando o critério de von Mises.

Metodologia

Neste trabalho a primeira etapa consiste no estudo de um modelo físico já existente, com intuito de comparar com um modelo numérico, a fim de verificar possíveis pontos de superdimensionamento. A segunda etapa refere-se ao modelamento da estrutura em CAD, a fim de iniciar um esboço de projeto a ser modificado conforme os resultados a serem obtidos.

Uma vez definida a geometria o terceiro passo consiste na análise modal da estrutura, sem aplicações das cargas, com o objetivo de verificar as frequências naturais, nas quais a estrutura é excitada. A partir dos autovetores obtidos desta análise modal foi possível visualizar os modos de vibração da estrutura. Com este tipo de análise é possível sugerir reforços que venham ser adicionados. A última etapa foi a realização de uma análise estática da estrutura do chassi a fim de verificar a integridade da estrutura segundo os critérios de von Mises.

Apresentação do Chassi do reboque

É importante deixar claro que um reboque é composto por vários outros componentes como, suspensão, parte elétrica, engate e pneus, entretanto este trabalho estará focado apenas na parte estrutural do Chassi. A Fig.1 ilustra a estrutura do chassi que será alvo de estudo neste trabalho modelado em CAD.

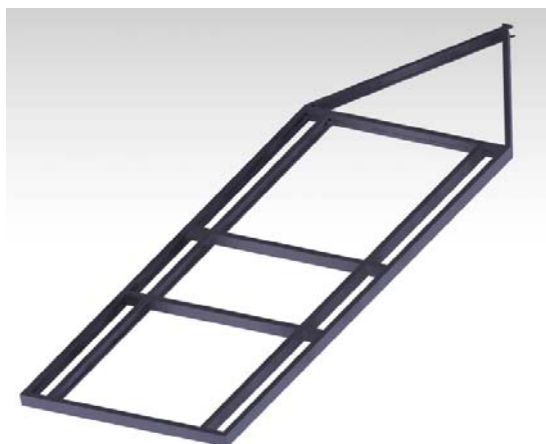


Figura 1 – Desenho do Chassi em CAD

Análise Modal

A análise consiste na extração dos modos de vibração da estrutura, e das frequências naturais do sistema (Rao,1999). A forma matemática da equação do movimento é apresentada conforme eq. (1).

$$[m] \cdot \ddot{\vec{x}} + [c] \cdot \dot{\vec{x}} + [k] \cdot \vec{x} = \vec{F} \quad (1)$$

Onde m é a matriz de massa, c a matriz de amortecimento e k a matriz de rigidez. O vetor x representa o deslocamento e suas derivadas sucessivas a velocidade e aceleração. Considerando que o sistema não possui nenhum tipo de amortecedor a equação é reduzida conforme eq. (2).

$$[m] \cdot \ddot{\vec{x}} + [k] \cdot \vec{x} = \vec{F} \quad (2)$$

Após algumas manipulações matemáticas chega-se a eq. (3),

$$[[k] - \omega^2 \cdot [m]] \cdot \vec{X} = \vec{0} \quad (3)$$

Resolvendo a eq. (3) é possível extrair os autovalores e os autovetores da equação. Os autovalores são as frequências naturais e os autovetores são os modos de vibração do sistema. Tanto para a realização da análise modal e na sequência análise estática foi considerado um chassi composto por um perfil C. Todos os perfis foram especificados em aço 1020, para facilitar a aquisição do mesmo, pois esse aço é bastante comercial. As propriedades mecânicas são fornecidas na Tab. 1, de acordo com o manual do fabricante que será adquirido o material.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais (Fonte: Beer & Jhonston, 3º edição).

	Material	Seção transversal [mm]	Inércia [m ⁴]	Módulo de Young [Pa]	Poisson	Densidade [kg/m ³]
Estrutura	1020	100x50x17 (espessura 2.25 mm)	1.846e-7	210e9	0.33	7830

A estrutura do chassi será modelada em elementos finitos via Ansys. Foi escolhido o elemento BEAM4, que é um elemento de viga elástico 3D, uniaxial de tensão, compressão, torção e flexão. Este elemento pode conter seis ou sete graus de liberdade em cada nó: translação nodal nas direções x,y,z e rotação nodal sobre os eixos x,y,z . Maiores detalhes sobre este elemento podem ser consultados no Manual do Ansys.

Foram aplicadas condições de contorno de restrição de deslocamento e rotação nos nós 1, 7, 8,11 e 12 da estrutura, conforme ilustrado na fig.2.

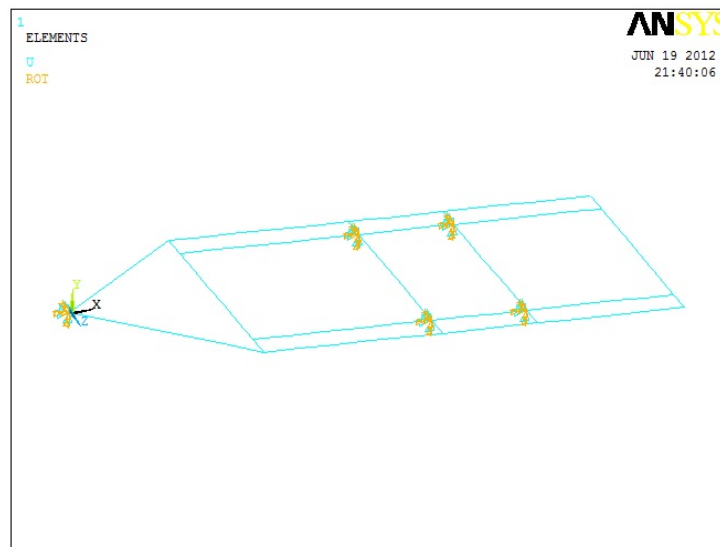
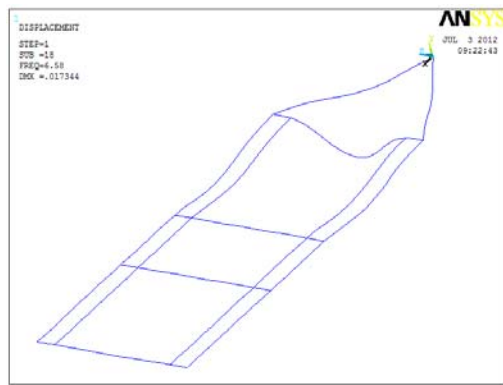
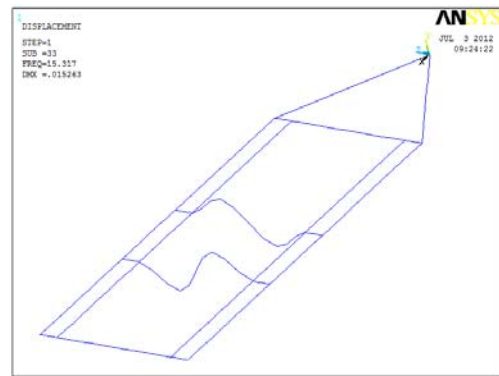


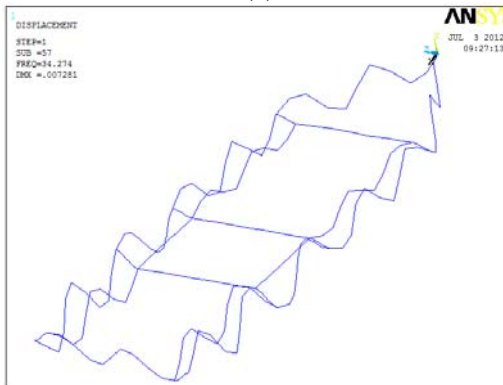
Figura 2- Geometria do Chassi para análise modal.



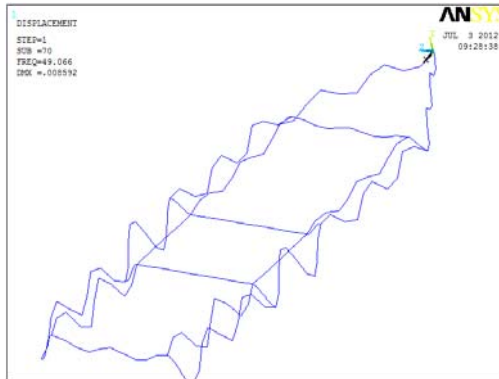
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3 - Modos de vibração da estrutura: (a) 6,58Hz, (b) 15,31 Hz, (c) 34,27 Hz (d) 49,06Hz.

Tabela 2. Modos de vibração versus Frequências naturais.

Modos de vibração	1°	2°	3°	4°	5°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	
Frequências [Hz]	0.566	0.798	1.24	1.60	2.65	3.01	3.82	3.91	4.41	4.87	5.26	
13°	14°	15°	16°	17°	18°	19°	20°	21°	22°	23°	24°	25°
5.55	5.55	5.61	5.74	6.27	6.58	6.75	8.14	10.38	10.39	10.75	10.97	11.77
26°	27°	28°	29°	30°	31°	32°	33°	34°	35°	36°	37°	38°
12.18	12.41	12.66	13.75	13.75	14.80	15.07	15.31	15.52	16.20	17.39	18.45	19.62
39°	40°	41°	42°	43°	44°	45°	46°	47°	48°	49°	50°	51°
19.62	19.75	20.75	20.89	22.39	22.91	24.63	24.82	27.60	28.28	29.70	30.04	30.54
52°	53°	54°	55°	56°	57°	58°	59°	60°	61°	62°	63°	64°
31.07	31.63	32.59	33.50	36.38	37.00	37.62	37.00	37.62	37.91	37.91	38.87	42.63
65°	66°	67°	68°	69°	70°	71°	72°					
44.41	44.58	46.23	48.51	49.06	49.75	49.75	50.513					

Para esta configuração geométrica da estrutura do chassi estão presentes praticamente todas as frequências conforme pode ser observado na Fig.3 e Tab.2. Nesse contexto a decisão que deve ser tomada é o aumento da rigidez da estrutura a fim de deslocar a frequências de ressonância para patamares mais elevados. Infelizmente não é possível evitar a exposição de um sistema as suas frequências de ressonância, mas é possível atenuar ou deslocar tais frequências através da inserção de massa ao sistema para aumentar a rigidez ou ainda instalando atenuadores de vibração para diminuir a amplitude da excitação. Obviamente a segunda opção é de natureza mais complexa e custo mais elevado. Outro fator que dificulta essa operação é o tamanho das peças, que são relativamente grandes nessa estrutura específica.

Análise Estrutural

Ao finalizar a análise modal da estrutura, o próximo passo consistirá em realizar a análise estrutural, com intuito de verificar sua integridade do chassi segundo os critérios da máxima energia de distorção. Para

essa análise via elementos finitos foi utilizado foi o utilizado o elemento de viga BEAM 188. Este elemento pode ter seis ou sete graus de liberdade por nó, e algumas propriedades diferenciadas, como a possibilidade de se trabalhar com qualquer tipo de seção transversal, além de possibilitar a visualização da estrutura em três dimensões. A análise estrutural pode ser realizada matematicamente via elementos finitos através da expansão da seguinte fórmula:

$$\{F\} = [k] \cdot \{u\} \tag{4}$$

Onde F é o vetor de forças, k é a matriz de rigidez e u é o vetor de deslocamento.

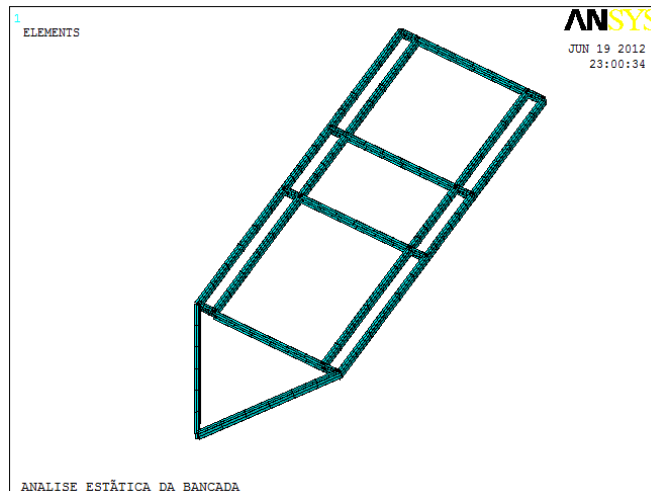


Figura 4 – Detalhe do chassi discretizado com elemento BEAM 188.

Este tipo de reboque é projetado para transportar veículos de pequeno porte com peso médio de 950 kg até veículos de porte maiores com peso médio de 1600 kg. Para efeito desta análise estrutural do chassi será utilizada a solicitação máxima, neste caso a maior carga de veículo a ser transportado.

Tabela 3. Valores estimados de carga sobre a estrutura do Chassi.

Discriminação	Carga
Força axial dianteira	4800 N
Força axial dianteira	4800 N
Força axial traseira	3600 N
Força axial traseira	3600 N
Força radial	16000 N

Para um melhor esclarecimento, os carregamentos aplicados na estrutura simulam as 4 rodas do veículo que será transportado apoiado no chassi. Desta maneira a massa do veículo é distribuída diferentemente entre as 4 rodas, a distribuição segue geralmente a seguinte forma. A parte dianteira concentra 60% da massa do veículo e a traseira corresponde aos outros 40%. Dessa forma utilizando o veículo que corresponde à máxima solicitação temos o seguinte equacionamento, para parte dianteira.

$$\frac{((1600 \cdot 10) \cdot 0.6)}{2} = 4800 N \tag{5}$$

Na parte traseira do veículo.

$$\frac{((1600 \cdot 10) \cdot 0.4)}{2} = 3600 N \tag{6}$$

Para a força radial foi considerado o peso total do veículo que é apresenta nas equações a seguir.

$$1600 \cdot 10 = 16000 N \tag{7}$$

A fig.5 apresenta o campo de deformação da estrutura chassi após a aplicação das cargas. Sendo assim, a tensão exercida sobre a estrutura não ultrapassa a tensão máxima do material, o que aumenta a possibilidade de alterações na geometria para a realização das modificações necessárias para a análise modal.

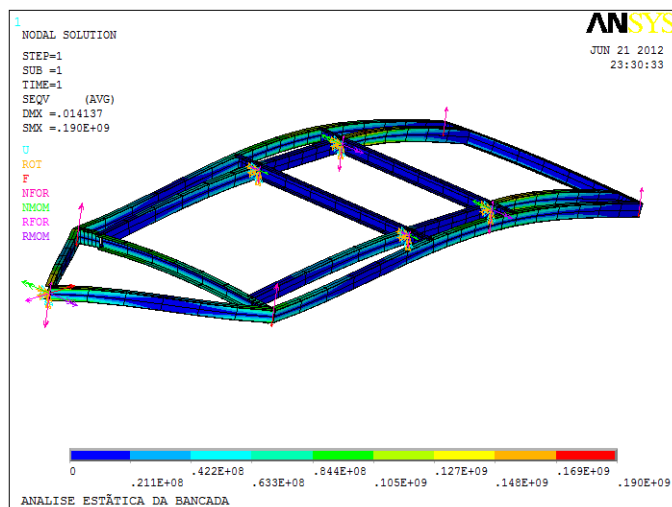


Figura 5- Estrutura deformada após a aplicação das cargas.

Conclusão

A partir dos resultados obtidos através das análises realizadas na estrutura do chassi, foi concluído que a estrutura com a presente geometria, tem capacidade de suportar os carregamentos impostos na análise estática, pois os pontos críticos das solicitações não se aproximam do módulo de elasticidade do material utilizado, como pode ser verificado na Fig.5. Após o estudo dos resultados obtidos com análise modal do chassi, foi verificado que a estrutura não foi dimensionada levando em conta os modos de vibrações. Conforme demonstrado na Tab.2 a estrutura com a geometria original responde a praticamente todas as frequências. A partir deste trabalho serão realizados novos estudos a fim de definir uma nova geometria com o objetivo de reduzir as frequências naturais do sistema sem perder a resistência estrutural.

Referências

Ansys Inc., Manual do software ANSYS® 12.1.

Grison, V., “Ferramentas para análise dinâmica e estrutural de um reboque de linha leve”, Dissertação de mestrado, UFRGS- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre –RS, 2005

Nascimento, V., “Desenvolvimento de Reboques de Semirreboques Canavieiros”, Dissertação de mestrado, UFRGS- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre –RS, 2009.

Hougaz, A.B., “Análise Probabilística de Durabilidade Aplicada a Veículos de Transporte de Carga Rodoviária, Dissertação de Doutorado, Escola politécnica da USP, São Paulo – SP, 2005.

Peres, G., “Uma Metodologia para Simulação e Análise Estrutural de Veículos de Transporte de Carga ”, Dissertação de mestrado, UFRGS- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre –RS, 2006.

RAO Singiresu, S., “Mechanical Vibrations “, Addison Wesley Publisinhg Company , Massachusetts ,1999

Shigley, Joseph, E., “Projeto de Engenharia Mecânica”, Editora Bookman , 2005

Hibbeler R.C., “Mecânica Estática”, Livros Técnicos e Científicos S.A. , Rio de Janeiro, RJ, 1999