

AVALIAÇÃO DA RIGIDEZ TORSIONAL DE UMA ESTRUTURA VEICULAR TIPO SPACE FRAME PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS COM ESTUDO DE CASO

Fernando César Gama de Oliveira

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

Prof. Dr. José Antônio Ferreira Borges

zeborges@mecanica.ufu.br

Resumo: *O desenvolvimento de estruturas veiculares requer que determinados parâmetros tais como massa e rigidez estejam relacionados através de uma solução de compromisso. A configuração final de um chassi rígido e robusto o suficiente para suportar os diversos tipos de esforços, ao mesmo tempo que, apresente um baixo peso tem sido um grande desafio aos pesquisadores e construtores de estruturas veiculares. Estruturas complexas tais como as veiculares são analisadas através de modelos computacionais onde a solução é obtida por métodos aproximados, como o método de elementos finitos (FEM). Dentro deste contexto, este trabalho faz a aplicação do método de elementos finitos com a finalidade de avaliar a rigidez torsional, bem como a massa de um chassi tipo space frame através da aplicação de um estudo de caso. Os resultados obtidos são de grande importância para as etapas posteriores ao trabalho, pois visa ao refinamento e otimização do modelo.*

Palavras-chave: *chassis, rigidez, massa, FEM, otimização.*

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como principal objetivo conceber e projetar uma estrutura veicular tipo space frame visando aplicação em um projeto mais amplo e diversificado onde pretende-se construir o protótipo de um veículo esportivo de alto desempenho. O tema em estudo foi definido para ser desenvolvido no formato de uma dissertação de mestrado na área de dinâmica veicular.

A escolha do tema foi baseada na possibilidade de desenvolver o trabalho em etapas, bem como na disponibilidade dos recursos. A grande quantidade de publicações científicas, bem como dissertações na área de dinâmica de veículos têm também grande influência na escolha do estudo de caso proposto. A contribuição esperada desse trabalho está focada no desenvolvimento da estrutura do veículo. Essa estrutura deverá atender a todos os requisitos de rigidez estrutural e limitações de peso, através de uma solução de compromisso. Ela deve ser capaz de suportar os diversos tipos de esforços estáticos e dinâmicos decorrentes do uso do veículo. As boas características de manobrabilidade e dirigibilidade são, em grande parte, asseguradas pela obtenção de uma estrutura robusta e bastante rígida, exercendo influência direta no conforto dos passageiros.

A disponibilidade de ferramentas computacionais modernas viabiliza a manipulação dos dados de entrada, bem como fornece resultados de análise precisos e confiáveis. Como a maioria das estruturas de importância prática, as estruturas veiculares são de natureza complexa. Para estruturas complexas a solução analítica torna-se inviável, de forma que a utilização de métodos numéricos permite o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões a partir de um modelo matemático que leva em consideração a geometria, carregamento e condições de contorno do sistema analisado. Desta forma, softwares de elementos finitos tais como o ANSYS representam uma poderosa ferramenta para o desenvolvimento do trabalho.

O resultado final do projeto será validado experimentalmente visando sua real aplicação no protótipo a ser construído.

2. ABORDAGEM TEÓRICA

2.1 Estruturas básicas

A forma triangular possibilita a construção de estruturas bastante rígidas devido às insignificantes mudanças na sua forma e dimensões, desde que nenhum dos seus lados principais seja rompido. Entretanto, a forma quadrada ou retangular apresenta uma baixíssima rigidez estrutural, uma vez que sofre deformações na direção diagonal mesmo quando pequenos carregamentos são aplicados.

Para proporcionar maior rigidez às formas quadradas, algumas opções de travamento podem ser empregadas. Uma opção é o travamento diagonal simples que reduz bastante a deformação nessa direção. Um duplo travamento diagonal garante uma rigidez consideravelmente maior (Adams, 1993), porém só é usado quando um carregamento bastante severo é aplicado à estrutura. Uma outra alternativa que garante o mesmo efeito do travamento simples é a utilização de painéis de metal de baixa espessura para garantir maior rigidez diagonal à forma retangular. Esses podem ser utilizados como paredes “corta-fogo”, assoalhos e painéis de instrumentos em substituição à construção complexa e pesada de tubos diagonais. As estruturas básicas bem como algumas opções de travamento são ilustradas na figura 1.

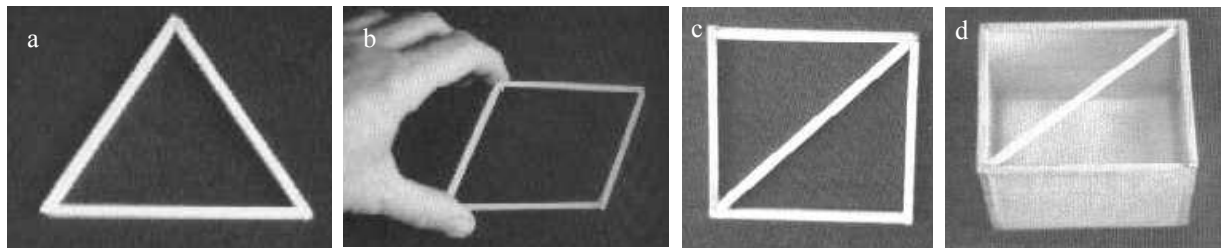


Figura 1: a. Forma triangular; b. Deformação diagonal de uma forma quadrada na presença de carregamento; c. Travamento simples diagonal; d. Painél de metal com travamento simples.

2.2 Rigidez vs. Resistência

A rigidez da estrutura de um veículo afeta significativamente suas características de manobrabilidade e dirigibilidade (handling), sendo portanto um importante parâmetro a ser estabelecido (Thompson, 1998; Happian, 2002). Quando se trata da rigidez de uma estrutura veicular deve-se ter em mente como principal preocupação os deslocamentos e deformações e não o nível de tensões. Segundo Kimbal (1999), os problemas enfrentados pelos engenheiros raramente incluem projetos que submetem os materiais ao seu limite de escoamento (com exceção dos projetos aeroespaciais). Rigidez refere-se ao quanto algum objeto sofrerá deflexão quando o mesmo for submetido a um carregamento. Já o termo resistência refere-se a quantidade de carregamento que o mesmo objeto poderá suportar antes que ele entre em colapso. Portanto, os termos rigidez e resistência são distintos.

As duas propriedades mais importantes que se relacionam com a rigidez são o módulo de Young (módulo de elasticidade) do material e o momento de inércia de área da seção do perfil estrutural, também conhecidos como rigidez do material e rigidez geométrica respectivamente. A rigidez do material é a deflexão de uma amostra sob uma determinada carga por unidade de área. Define-se o momento de inércia de área em relação a um determinado eixo de referência como sendo a integral do produto do quadrado da distância ao eixo de referência por cada área elementar presente na superfície. Essa definição é expressa pelas equações (1) e (2).

$$I_x = \int y^2 dA \quad (1)$$

$$I_y = \int x^2 dA \quad (2)$$

Onde: I_x : momento de segunda ordem em relação ao eixo x (m^4);

I_y : momento de segunda ordem em relação ao eixo y (m^4);

y : distância da área elementar ao eixo x (m);

x : distância da área elementar ao eixo y (m);

dA : área elementar da superfície.

A metodologia utilizada para se calcular o momento de inércia de área está ilustrada na figura 2.

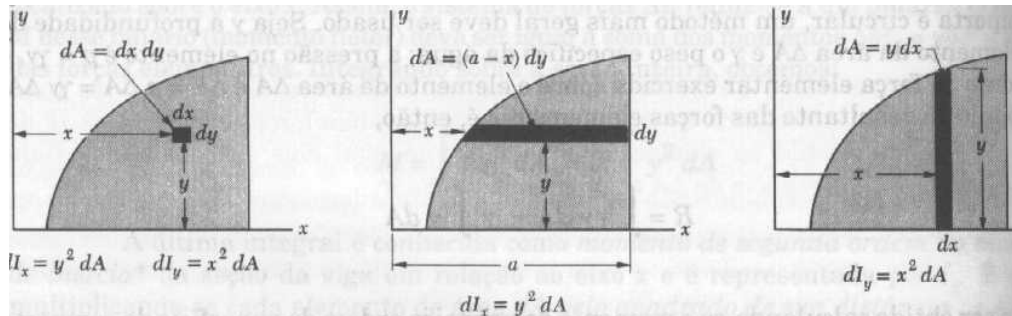


Figura 2: Metodologia para o cálculo do momento de inércia de área.

O momento polar de inércia de uma superfície também é de grande importância, pois é uma propriedade que deve ser considerada em problemas relativos a torção. Essa propriedade pode ser definida como a integral de uma determinada área de superfície em relação a um pólo. A equação 3 representa essa definição.

$$J_o = \int r^2 dA \quad (3)$$

Onde: J_o : momento polar de inércia (m^4);

r : distância do elemento de área dA ao pólo O (m).

A metodologia utilizada para se calcular o momento polar de inércia está ilustrada na figura 3.

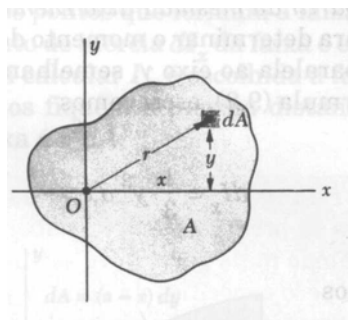


Figura 3: Metodologia para o cálculo do momento polar de inércia.

A equação (4) representa essa propriedade em função dos momentos de inércia de área.

$$J_o = I_x + I_y \quad (4)$$

Existem dois aspectos relativos à rigidez estrutural de um chassi:

- Rigidez a flexão: Propriedade estática referente à maneira como o chassi sofre deflexão à medida que o mesmo é submetido a esforços verticais na região do entre-eixos. A maioria dos veículos não apresenta problema de rigidez flexional cujos esforços são provenientes do peso de componentes como motor, transmissão e passageiros.
- Rigidez torsional: Propriedade estática referente à maneira como o chassi sofre deflexão quando submetido a um momento aplicado em torno do seu eixo longitudinal. Esta característica influi diretamente na manobrabilidade e dirigibilidade do veículo.

2.3 Tipos de chassis

Existem dois tipos básicos de estrutura veicular: o clássico quadro de chassi e o tipo monobloco. O primeiro suporta diretamente as suspensões, o conjunto propulsor e a carroceria, enquanto que o segundo integra chassi e carroceria em uma única peça.

2.3.1 Backbone chassis

Nesta concepção o túnel central é o principal membro estrutural do projeto. Neste tipo de estrutura a grande desvantagem é justamente o túnel central que ocupa um grande volume no compartimento dos passageiros e compromete assim o uso do espaço interno. Além disso, o acesso para manutenção de componentes mecânicos como motor e caixa de mudanças é dificultado neste tipo de projeto em função dos painéis que compõem o chassi. Essa estrutura não proporciona proteção contra impactos laterais. A figura 4 ilustra um chassi desse tipo feito em alumínio.

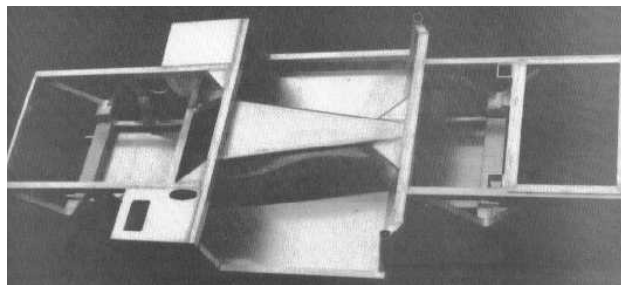


Figura 4: Backbone chassis feito em alumínio.

2.3.2 - Estrutura tubular tipo space frame (bird cage)

Uma estrutura tipo 'space frame' verdadeira é composta de tubos submetidos apenas à tração e compressão. Isto significa que cada ponto de suporte deve ser composto por membros em três planos, evitando cargas de torção e flexão. Na prática é quase impossível construir um chassi tipo 'space frame' eficiente, porém existem diversos excelentes exemplos deste tipo de construção como o Mercedes 300SLR, Maseratti Bird Cage, Lamborghini Countach (figura 5), etc.

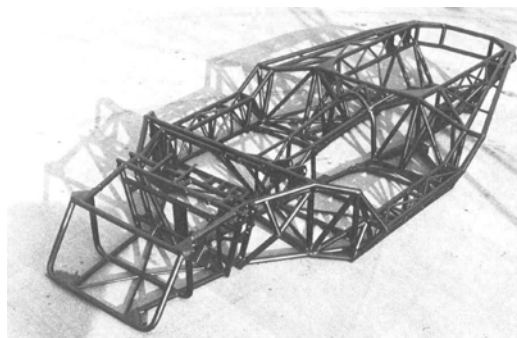


Figura 5: Space frame chassis.

2.3.3 Monocoque

Constitui-se por um único arranjo que define toda a forma ao veículo. Esse tipo de chassis já encontra-se incorporado ao corpo do veículo em uma única estrutura constituída por diversos membros soldados. O assoalho que abrange a maior área da estrutura assim como outras partes são prensadas pelo processo de estampagem. Esse tipo de estrutura é bastante eficiente na proteção contra impactos, sendo usado em competições de alto nível (Fórmula 1 e Fórmula Indy). O resultado deste tipo de projeto é uma estrutura incrivelmente rígida (figura 6).

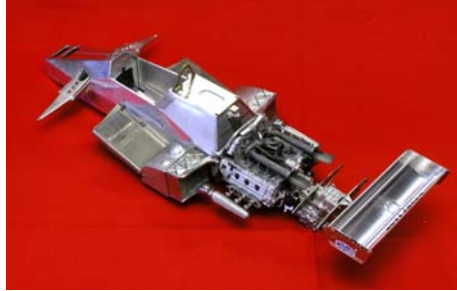


Figura 6: Estrutura monocoque de uma Ferrari F-1.

2.3.4 Chassis tipo "Ladder" ou escada

O chassis tipo “ladder”, também chamado de “twin-rail”, é tipicamente construído a partir de tubos retangulares, redondos ou em perfil aberto tipo C. É composto de membros longitudinais chamados longarinas e transversais chamados travessas. Nesta abordagem pode-se usar longarinas retas ou curvas, paralelas ou não, com duas ou mais travessas. Os suportes geralmente são prolongamentos das longarinas ou travessas e os pontos de fixação da suspensão podem ou não estar integrados ao projeto. A figura 7 ilustra esse tipo de estrutura.

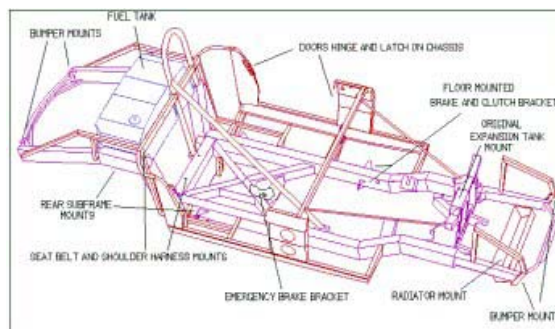


Figura 7: “Ladder chassis”.

2.3.5 Monobloco

A estrutura monobloco é caracterizada pelo fato do chassis, carroceria e estrutura frontal estarem integrados em uma única peça soldada. Este tipo de estrutura foi utilizado primeiramente em carros pequenos e depois evoluiu para aplicação em praticamente todas as categorias de automóvel. Do ponto de vista estrutural um monobloco tem que resistir aos mesmos esforços e atender aos mesmos requisitos de um veículo similar que possua quadro de chassis e carroceria. Em função disto e apesar da diferença filosófica entre as duas estruturas, é possível identificar em um monobloco regiões significativamente mais reforçadas que podem ser associadas a longarinas, travessas e colunas. Geralmente, o principal membro estrutural de um monobloco é sua lateral inferior. A estrutura monobloco (figura 8) é a preferida da indústria automobilística para veículos de passeio pois a sua utilização leva à redução dos custos de produção e do peso final do veículo (Happian, 2002).

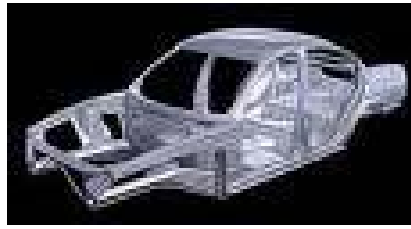


Figura 8: Estrutura monobloco.

3. ESTUDO DE CASO: DESCRIÇÃO DO CHASSIS

A concepção, projeto e adaptação de veículos esportivos de alto desempenho requerem que a sua estrutura seja bastante rígida e robusta. Assim, uma estrutura tubular tipo space frame é bastante adequada para este tipo de aplicação. Tomando como base de inspiração um veículo modelo Puma GTS, mostrado na figura 9, foram estabelecidos os requisitos básicos do novo projeto.



Figura 9: Veículo Puma GTS usado como base de inspiração para o projeto.

As características do veículo a ser desenvolvido são:

- Peso máximo do veículo completo: 800 Kg;
- Distância entre eixos: 2,62 m;
- Bitola traseira e dianteira: 1,475m;
- Suspensão dianteira: SLA (Short Long Arm);
- Suspensão traseira: MacPherson (com agregado);
- Motor: Ford 302 V8 central (entre eixos) – tração traseira;
- Câmbio: VW Santana.

Os três principais compartimentos da estrutura do veículo são um berço dianteiro para abrigar a suspensão dianteira e a caixa de direção, um habitáculo central para os ocupantes com a presença de um túnel central para aumentar a rigidez da estrutura e um berço traseiro para alojar o motor juntamente com o câmbio e a suspensão traseira. Tubos de aço de seção circular foram utilizados para análise da estrutura em elementos finitos. Esses apresentam um diâmetro externo igual a 50,8 mm com espessura de parede igual a 1 mm. Esta geometria fornece momento de inércia de área em relação a dois eixos de referência ortogonais entre si de $0,484\text{e-}7 \text{ m}^4$. O momento polar de inércia é igual a $0,968\text{e-}7 \text{ m}^4$.

A tabela 1 apresenta as propriedades do aço utilizado para modelagem do chassis.

Tabela 1: Propriedades do aço.

Módulo de elasticidade (N/m^2)	$2,1 \times 10^{11}$
Coefficiente de Poisson	0,3
Massa específica (Kg/m^3)	7850

Para a definição da geometria e dimensões do chassi foi feito um estudo de ocupação de espaço levando em consideração seus principais componentes como conjunto propulsor, suspensões e pneus. A partir disto foi definido um arranjo de tubos ligando os pontos de aplicação dos esforços de acordo com as boas práticas da engenharia e visando obter uma estrutura tipo space frame adequadamente travada. De acordo com essa metodologia, foi possível obter as dimensões geométricas dos berços para abrigar os ocupantes e os principais componentes mecânicos.

3.1 Análise da rigidez torsional da estrutura

A avaliação da rigidez torsional do chassi foi feita a partir de uma modelo de elementos finitos submetido às condições de contorno mostradas na figura 10.

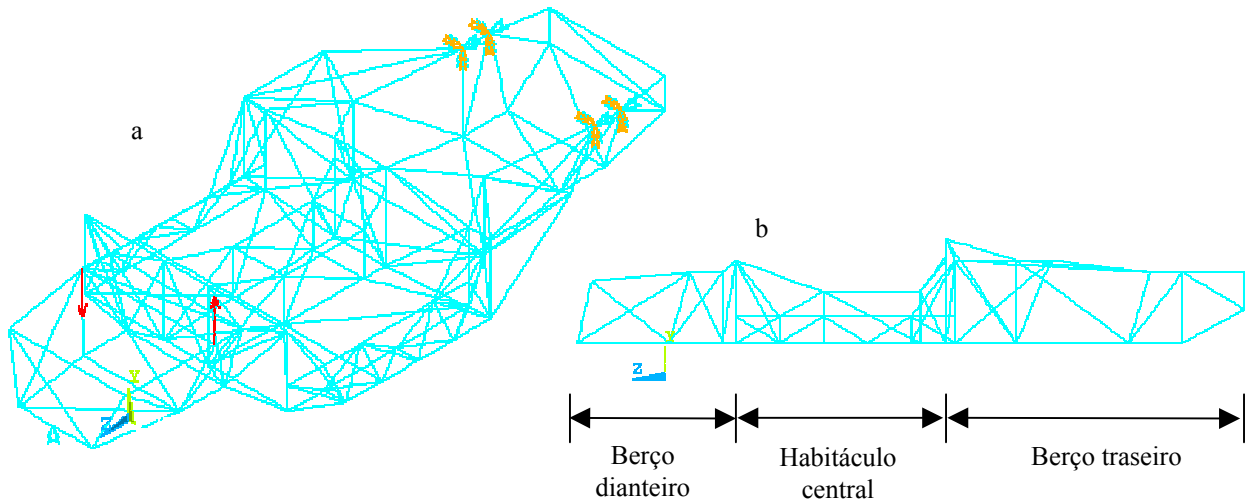


Figura 10: a. Condições de contorno aplicadas ao modelo para a obtenção da rigidez torsional; b. Compartimentos principais da estrutura.

Thompson (1998) descreve uma metodologia para o cálculo da rigidez torsional através da aplicação de um carregamento de torção na seção de ancoragem da suspensão dianteira enquanto a seção de ancoragem da suspensão traseira é mantida engastada. Para eliminar a influência simultânea da flexão, a estrutura é também apoiada verticalmente no centro de sua extremidade dianteira. O torque aplicado é constituído de forças verticais iguais e em sentidos opostos com magnitude de 4000 N. O torque resultante deste carregamento pode ser calculado pela equação (5).

$$T = F.d \quad (5)$$

Onde: T: torque aplicado [N.m];

F: esforço vertical aplicado [N];

d: distância transversal entre os pontos de aplicação das forças verticais [m].

Restrições de translação nas três direções (U_x , U_y e $U_z = 0$) e de rotação (θ_x , $\theta_y = 0$) e θ_z livre foram aplicados nos pontos de fixação da suspensão traseira. De forma analítica, a expressão para calcular a rigidez torsional da estrutura é dada pela equação (6).

$$Kc = \frac{T}{\phi} = \frac{F.d}{0.5.(\phi_m + \phi_p)} \quad (6)$$

Onde: Kc: rigidez torsional [N.m/°];

T: torque aplicado [N.m];

ϕ : ângulo de torção médio [graus °];

ϕ_m : ângulo de torção devido a deflexão no ponto de aplicação do esforço vertical na extremidade dianteira esquerda;

ϕ_p : ângulo de torção devido a deflexão no ponto de aplicação do esforço vertical na extremidade dianteira direita.

Tanto o ϕ_m quanto o ϕ_p são obtidos através das deflexões verticais v_m e v_p nas duas extremidades (equações 7 e 8).

$$\phi_m = \arctan\left(\frac{v_m}{d/2}\right) \quad (7)$$

$$\phi_p = \arctan\left(\frac{v_p}{d/2}\right) \quad (8)$$

Onde: v_m : deflexão vertical no ponto de aplicação do esforço na extremidade dianteira esquerda;

v_p : deflexão vertical no ponto de aplicação do esforço na extremidade dianteira direita.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Para efeito de modelagem e análise, assume-se que o material é elástico e linear. A análise linear estática resultou em pequenas deformações nos pontos de aplicação dos esforços. Por efeitos de assimetria da estrutura, as deformações resultantes dos esforços verticais não foram iguais nos dois pontos de aplicação de carga.

Como resultado, a rigidez torsional obtida para a estrutura é igual a 886 kg.m/° e a massa total do chassis é de 142 kg. Devido ao posicionamento dos componentes mecânicos dentro da distância entre eixos previamente estabelecida, o habitáculo central acabou ficando com suas dimensões reduzidas. Algumas alternativas estão sendo avaliadas visando resgatar as condições necessárias à acomodação confortável e segura dos ocupantes tais como: traçado do chassis na presença real dos componentes do veículo e alteração da distância entre eixos e bitola dianteira.

As etapas posteriores ao trabalho conduzirão a uma análise da sensibilidade da rigidez da estrutura através da verificação de determinados membros estruturais de travamento que exercem maior ou menor influência na massa e na sua rigidez torsional. Essa análise é bastante útil na determinação de parâmetros de grande sensibilidade que constituirão variáveis de projeto nos métodos de otimização que serão empregados na sequência.

5. AGRADECIMENTOS

- À Comissão organizadora do 16° POSMEC;
- Ao Laboratório de Sistemas Mecânicos (LSM);
- Ao CNPq.

7. REFERÊNCIAS

- Adams, H., 1993, “Chassis Engineering”, Hp Books;
- Happian, J.S., 2002, “An Introduction to Modern Vehicle Design”; ISBN 0 7680 0596 5 ON –R-295; Society of Automotive Engineers, Inc.; Reed Educational and Professional Publishing; 585p;
- Kimbal, S., 1999, “Don't focus on stress when stiffness is the problem“, Machine Design Magazine; Laucadia; California; 4p;
- Thompson, L.L., 1998, “Design of a Winston Cup Chassis for Torsional Stiffness”; SAE Technical Paper Series No. 983053 – Motorsports Engineering Conference Proceedings Volume 1: Vehicle Design and Safety; Dearborn, Michigan, USA.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

EVALUATION OF A SPACE FRAME VEHICLE STRUCTURE TORSIONAL STIFFNESS USING THE FINITE ELEMENT METHOD WITH CASE STUDY

Fernando César Gama de Oliveira

Faculty of Mechanical Engineering – Federal University of Uberlândia - Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M – Uberlândia/MG CEP: 38400-902
fcoliveira@mecanica.ufu.br

Prof. Dr. José Antônio Ferreira Borges

zeborges@mecanica.ufu.br

Abstract: *The development of vehicle structures requires that mass and stiffness be related through a compromise solution. The final configuration of a light weight stiff chassis to support several types of efforts has been a big challenge to the vehicle structure researchers and manufacturers. Despite that there is not a better way to construct a chassis, its modeling and analysis run away to the classical analytical methods that provide the exact solution of the problem. Complex structures are analyzed and shaped through numerical methods like the finite element method (FEM). The objective of this work is to apply the finite element method to evaluate the torsional stiffness and mass of a space frame chassis. The results will be used in future optimization procedures.*

Keywords: *chassis, stiffness, mass, FEM, optimization.*