

DESENVOLVIMENTO PRELIMINAR DE ESTRUTURA TUBULAR PARA VEÍCULO DE FABRICAÇÃO ARTESANAL

Antônio Carlos Botosso

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

antonio.botosso@gmail.com.br

Resumo. Estimulado pelo forte crescimento da indústria automobilística dos últimos anos, principalmente do segmento fora-de-estrada, o presente trabalho, baseado num projeto preexistente, busca apresentar as etapas iniciais do desenvolvimento de um veículo especial de estrutura tubular. A preocupação do texto está centrada na utilização de modelos e métodos para análises estruturais por simulação computacional, visando principalmente à redução de massa do veículo. O texto apresenta também um breve estudo de ergonomia interna dos ocupantes, além de esclarecer ao leitor o procedimento para registro de um veículo de fabricação artesanal com o intuito de obter o licenciamento para circulação em vias públicas.

Palavras chave.: Veículos especiais (Desenvolvimento); Estrutura veicular; Método dos elementos finitos

1. Introdução

O aparecimento de veículos aptos ao uso fora-de-estrada confunde-se com o surgimento dos primeiros automóveis, já que no final do século XIX e começo do XX, havia poucas ruas e estradas pavimentadas.

A utilização de veículos fora-de-estrada só se tornou um esporte depois que soldados veteranos de guerra que, “durante a Segunda Guerra Mundial, perceberam que dirigir em estradas pavimentadas não era tão divertido quanto dirigir em situações adversas” (Hibbard, 1982), começaram a despendar tempo e dinheiro na modificação de veículos com o intuito de utilizá-los em estradas de areia, gelo ou lama.

Entre estes veículos estavam os “Volkswagen” com motor refrigerado a ar, que se destacaram em relação aos outros devido ao baixo custo das modificações, e principalmente a facilidade de manutenção devido à construção simples e ausência de radiador.

Difundido em todo o mundo, esse esporte vem ganhando cada vez mais destaque, inclusive no Brasil, onde o mercado de veículos tem crescido significativamente nos últimos anos. Segundo dados (DENATRAN), enquanto no período de 1998 a 2004 a taxa de crescimento se elevava em torno de 2,5 milhões de carros por ano, hoje o crescimento ultrapassa a marcada de 4,5 milhões.

Acompanhando esse crescimento, houve também um aumento na demanda por veículos com características de uso fora-de-estrada, o que pode ser notado pelo aparecimento de uma nova categoria de veículos, os modelos ditos “cross”, bem como o surgimento de novas marcas como a *TAC Motors®* e a *Troller®*, além da notável quantidade de feiras e eventos voltados a esse segmento.

Uma alternativa usual, a fim de se evitar os elevados custos de aquisição de veículos como os citados anteriormente, são os veículos especiais de estrutura tubular. Veículos estes que, devido ao tipo de construção e ao conjunto mecânico utilizado (em geral utilizando conjuntos de veículos Volkswagen refrigerados a ar), apresentam menor valor de compra. Muitas vezes, no entanto, devido a sua construção ser em geral feita artesanalmente, essas “gaiolas” (como são conhecidas popularmente) são impedidas de circular em vias públicas por não possuírem a documentação adequada.

2. Objetivo

Baseado num veículo fora-de-estrada tipo “gaiola” (termo que será utilizado no decorrer do trabalho) já existente, o projeto objetiva aprimorá-lo de maneira a torná-lo inovador no sentido de ser estudado adequadamente em relação a outros que, em sua grande maioria, senão na totalidade, são idealizados e fabricados empiricamente e acabam não atendendo normas e determinações para o registro e licenciamento para circulação em vias públicas.

Dentre as melhorias a serem feitas, a principal é a redução da massa da estrutura em cerca de 33%, ou seja, deseje-se obter uma massa correspondente a dois terços da atual, ganhando-se assim desempenho com a diminuição da relação peso/potência e reduzindo o custo da matéria prima para fabricação.

É importante ressaltar que se considera como estrutura apenas o conjunto estrutura tubular mais chassi. No caso da gaiola em estudo, o chassi provém de um “Volkswagen Fusca”.

A Figura 1 corresponde à gaiola a partir da qual será desenvolvido o novo projeto e a Tabela 1. Características da gaiola original apresenta as principais características técnicas do veículo.



Figura 1. Modelo base do projeto

Em paralelo à melhoria estrutural, outros pontos, não menos importantes, serão abordados:

- Verificação de normas e leis vigentes para veículos de fabricação artesanal para o devido registro e licenciamento com o intuito da permissão para a circulação em vias públicas
- Análise de *packaging* para verificação da acomodação interna do usuário
- Estudo de ferramentas CAD (*Computer Aided Design*) e CAE (*Computer Aided Engineering*) disponíveis no software UGS NX-7®, a fim de se obter um bom modelo virtual da gaiola seguido pela adequada simulação estrutural via elementos finitos.

3. Legislação e normas

O Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN, órgão que regulamenta veículos circulantes, trata, nas resoluções citadas abaixo, sobre as normas e exigências necessárias para se obter o licenciamento para veículos de fabricação artesanal, veículos especiais e veículos modificados.

CONTRAN Resolução nº25. **Dispõe sobre modificações de veículos e dá outras providências, previstas nos artigos. 98 e 106 do Código de Trânsito Brasileiro.**

CONTRAN Resolução nº185. **Estabelece os procedimentos para a prestação de serviços por Instituição Técnica Licenciada - ITL e emissão do Certificado de Segurança Veicular - CSV, de que trata o Art.106 do Código de Trânsito Brasileiro – CTB.**

CONTRAN Resolução nº14. **Estabelece os equipamentos obrigatórios para a frota de veículos em circulação e dá outras providências.**

CONTRAN Resolução nº48. **Anexo referente à resolução 14 estabelece requisitos de instalação e procedimentos para ensaios de cintos de segurança.**

CONTRAN Resolução nº63. **Disciplina do registro e licenciamento de veículos de fabricação artesanal, conforme o art. 106 do Código de Trânsito Brasileiro.**

As resoluções anteriores não afetam em termos construtivos a estrutura da gaiola já que tratam de questões burocráticas (Resolução nº25, nº185 e nº63) e da obrigatoriedade da instalação de equipamentos de segurança (Resolução nº14 e nº48). De maneira que, desde que todas as exigências sejam cumpridas, há liberdade na elaboração estrutural.

Resumidamente, o procedimento de licenciamento é composto por três etapas. O veículo possuindo todos os equipamentos obrigatórios para a sua categoria como faróis, espelhos retrovisores, buzina, cintos de segurança entre outros, deve passar por inspeção veicular a fim de ser emitido um CSV - Certificado de Segurança Veicular. Com o CSV em mãos, e a devida aprovação do veículo por engenheiro responsável, entra-se com um pedido de registro do veículo e emissão de documento junto ao DETRAN. Segue-se então com uma criação de número de chassi e marcação do mesmo ao veículo, para posteriormente o documento ser emitido.

Ressalva-se que uma pessoa física poderá licenciar três veículos de fabricação artesanal anualmente.

4. Modelo da Estrutura Tubular

Tabela 1. Características da gaiola original

MOTOR	
Número de cilindros	4
Refrigeração	Arrefecimento a ar
Alimentação	Gasolina
Potência máxima líquida	53 CV a 4200rpm
Torque máximo	105,1 Nm a 2600rpm
TRANSMISSÃO	
Tração	Traseira
Número de marchas	4 a frente e uma a ré
DIMENSÕES PRINCIPAIS	
Distância entre eixos	2,170 m
Bitola dianteira	1,290 m
Bitola traseira	1,540 m
Raio roda dianteira	0,335 m
Raio roda traseira	0,345 m
Massa total	818 kg
ESTRUTURA	
Tipo	Tubular
Característica	Tubos 2,0" parede de 3mm
Material	Aço 1020

A partir dos estudos feitos, e com base na gaiola existente apresentada anteriormente, o resultado final da modelagem ficou como apresentado na Figura 2. Um detalhe das conexões entre os tubos (em corte) é apresentado na mesma figura.

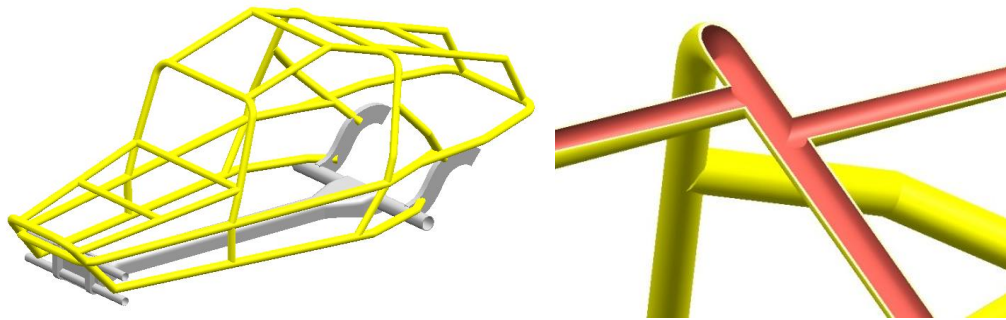


Figura 2. Estrutura tubular base e detalhe da conexão entre os tubos

A região estrutural em cinza da Figura 2 corresponde ao chassi Volkswagen utilizado no modelo original e que será mantido sem alterações na gaiola final. Ainda que não sofra alterações, sua modelagem é fundamental para que os esforços solicitantes sejam adequadamente transferidos à estrutura tubular (destacada em amarelo).

É a partir desse modelo, que a análises de *packaging* bem como as simulações estruturais serão feitas.

5. Características dimensionais e físicas da gaiola

5.1. Método de medição

Para as medidas mais simples, como bitola e distância entre eixos, utiliza-se simplesmente uma trena, no entanto, a fim de se determinar características como massa, posição do centro de gravidade e curso de suspensão, um método mais elaborado faz-se necessário.

Para aferir o curso de suspensão, com um macaco hidráulico apoiado num terminal de suspensão eleva-se a correspondente roda até que alguma das outras três desencoste do solo. Afere-se então o curso total da suspensão a partir do quanto a roda em questão elevou-se em relação ao solo.

No caso da massa da gaiola, procedesse da seguinte maneira: com um macaco hidráulico posicionado no centro de um dos eixos, ergue-se o veículo até que ambas as rodas do respectivo eixo desencostem do chão, de modo que haja normal nula. A partir desse ponto, puxa-se a haste do macaco com um dinamômetro de maneira a se conhecer a força (F_0) que está sendo exercida. Conhecidas as dimensões do macaco e a força aplicada na ponta da haste, é possível, através do Princípio de Pascal determinar o peso da gaiola naquele eixo (Figura 3).

Onde:

F_0 = força aplicada na ponta da haste do macaco

P = peso próprio da haste

F_1 = força aplicada ao pistão menor

F = peso sobre o macaco

R = raio do pistão maior

r = raio do pistão menor

c = distância da articulação ao pistão menor

d = distância do pistão menor à ponta da haste

α = inclinação da haste

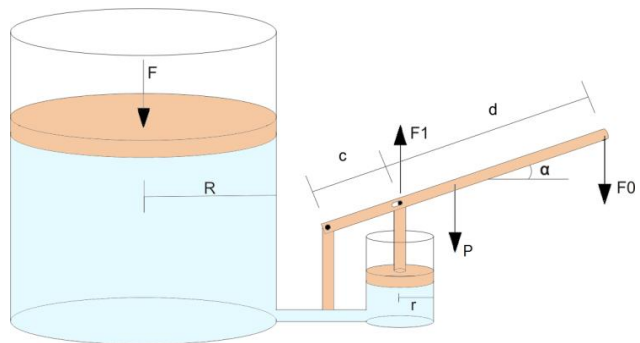


Figura 3. Arranjo para obtenção da massa da gaiola

Repete-se o experimento para o outro eixo. Com os dois valores dos pesos é possível conhecer a posição do centro de massa longitudinal através de um equilíbrio de momentos. Fazendo ainda mais uma vez, porém agora com o veículo inclinado numa rampa de ângulo conhecido, determina-se a nova distribuição de peso naquela situação.

A diferença entre a situação plana e a inclinada possibilita, através do equilíbrio de forças e momentos, determinar a altura do centro de gravidade.

A Figura 4 apresenta o esquema para determinação do centro de gravidade.

Onde:

a = distância do CG em relação ao eixo traseiro

b = distância do CG em relação ao eixo dianteiro

h = altura do CG em relação ao solo

M = massa total da gaiola

g = gravidade local ($9,8m/s^2$)

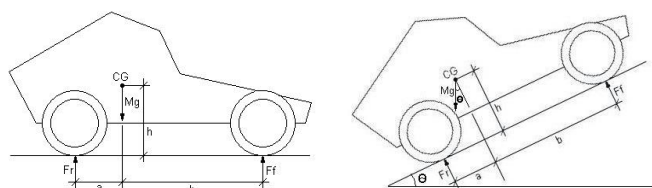


Figura 4. Esquema para determinação do CG

F_f = normal do eixo dianteiro

F_r = normal do eixo traseiro

Θ = inclinação da gaiola

5.2. Dimensões básicas

A Tabela 2 abaixo apresenta as dimensões características da gaiola obtidas através do exposto anteriormente.

Tabela 2. Dimensões da gaiola

DIMENSÃO	VALOR	UNIDADE
distância entre eixos	2,170	m
bitola dianteira	1,290	m
bitola traseira	1,540	m
raio roda dianteira	0,335	m
raio roda traseira	0,345	m
curso suspensão dianteira	0,140	m
curso suspensão traseira	0,200	m
peso do eixo dianteiro (plano)	2739,30	N
peso do eixo traseiro (plano)	5443,99	N
Peso total da gaiola	8183,29	N
peso do eixo dianteiro (inclinado)	2171,15	N
distância do CG em relação ao eixo traseiro	0,73	m
distância do CG em relação ao eixo dianteiro	1,44	m
altura do CG	0,62	m

6. Conforto interno

Estudos desse tipo são em geral realizados no início de um novo projeto, no entanto, como o veículo já existe, a análise, feita com o auxílio de ferramentas disponíveis no *software UGS NX-7®*, permitirá apenas verificar as condições do usuário.

6.1. Modelo

Modelos humanóides são utilizadas como referência para representar os ocupantes do veículo. A fim de se analisar com abrangência, o manequim bidimensional a ser utilizado possui características tais que 95% da população mundial está contemplada dentro de suas dimensões. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** resume as dimensões mais importantes do modelo relevantes ao estudo.

Tabela 3. Dimensões principais para o estudo proposto (SAE J826 Julho, 95)

ELEMENTO	DIMENSÃO (m)
1 Massa	91 (kg)
2 Estatura	1,85
3 Comprimento do braço	0,84
4 Comprimento total da perna	1,17
5 Largura dos ombros	0,48
6 Altura do cavalo	0,91
7 Tamanho do pé	0,29

6.2. Análise da postura

Com o manequim 2D devidamente posicionado na gaiola a partir das dimensões aferidas no veículo e seguindo o passo a passo proposto pelo *software UGS NX-7®*, seguiu-se com a análise de conforto pelo método do triângulo (Lee, Jung, & Chung, 1999). A Figura 5 ilustra a análise que consiste numa representação geométrica de um triângulo composto pelos pontos AHP (Accelerated Hell Point), SWP/SWC (Steering Wheel Point ou Steering Wheel Center) e HP (Hip Point) e a partir de intervalos pré determinados avalia o conforto interno.

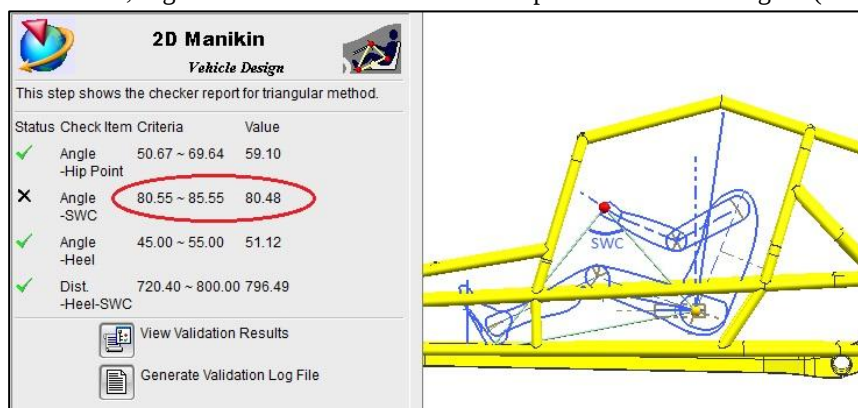


Figura 5. Método do triângulo

Considera-se neste trabalho que o pequeno desvio apresentado no ângulo SWC, não é suficiente para requerer mudanças na estrutura já que, em geral, uma gaiola não é utilizada em trajetos longos ou por períodos extensos, além de os impactos e oscilações que sofrerá em uso serem, por vezes, os maiores fatores de desconforto do usuário.

6.3. Alcance das mãos e contorno da cabeça

Essa análise é utilizada para se estimar a capacidade máxima de alcance do motorista, sentado com o cinto de segurança posicionado, com uma de suas mãos no volante e o pé direito posicionado no pedal do acelerador. Além disso, a verificação da região ocupada pela cabeça do motorista determina se haverá interferência desta com a estrutura. Mais uma vez utiliza-se o as ferramentas do *software* seguindo recomendações da SAE J287 para a análise do alcance das mãos e SAE J1052 para a região ocupada pela cabeça.

A zona máxima de alcance (verde - Figura 6) representa a região limite na qual o motorista consegue operar um dispositivo com as mãos fechadas. Pode-se observar, portanto, que o usuário não terá problema em alcançar qualquer aparelho ou dispositivo localizado no painel que se encontre até o centro deste.

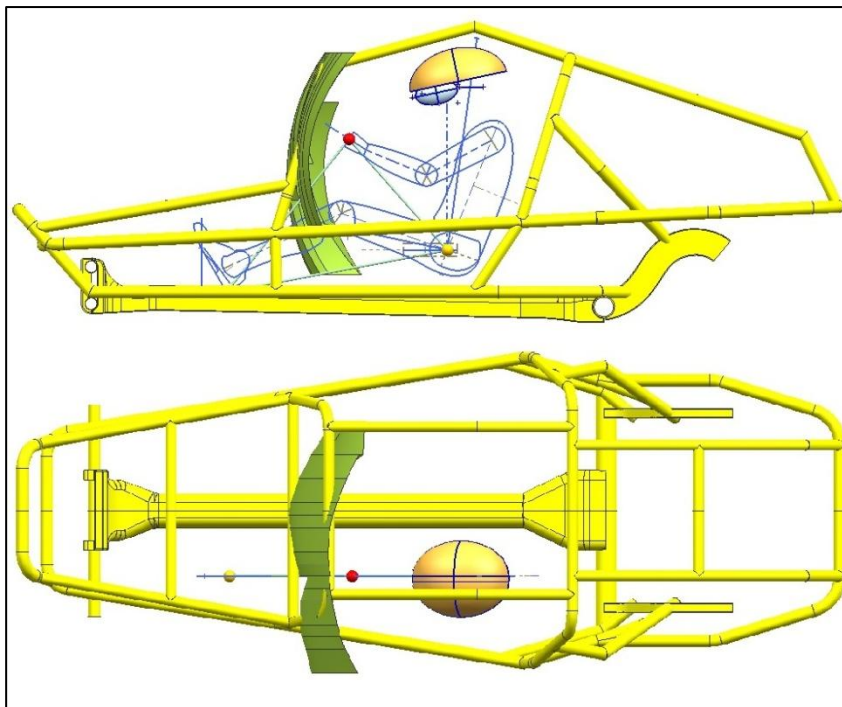


Figura 6. Zona de alcance e espaço para cabeça

Verifica-se também que a região total ocupada pela cabeça, dada a liberdade que ela possui para um motorista utilizando cinto de 3 pontos, não é suficiente para que haja interferência com a estrutura nem que ultrapasse o limite lateral máximo do veículo.

7. Análise estrutural da gaiola original

A primeira consideração a ser feita é a de que serão avaliados apenas os esforços atuantes na estrutura tubular da gaiola (em amarelo Figura 2), ou seja, sistemas como chassi, suspensão, direção etc serão desconsiderados da análise já que estes devem estar previamente dimensionados do veículo do qual foram retirados.

Seguindo os objetivos propostos para o projeto, as simulações e análises que seguirão terão fundamentalmente o intuito de reduzir massa mantendo uma resistência estrutural adequada para veículos fora-de-estrada segundo o método utilizado.

O método de análise proposto (Brown & Robertson, 2001), pressupõe que a estrutura dimensionada é suficientemente resistente de maneira que não haverá falhas de solda ou conexões. Isso significa que, somente cargas que causem deformações elásticas na estrutura serão estudadas, portanto, é recomendado que esse estudo seja utilizado na fase inicial de um projeto.

As principais cargas sofridas por um veículo são a flexão, dada pelo próprio peso dos componentes e elementos do carro e/ou por um carregamento simétrico aplicado no veículo, e a torção. O caso de torção pura, como será visto adiante, não ocorre isoladamente em situações reais, estará sempre combinado com o caso de flexão já que a gravidade sempre atuará. Tratando esses dois casos com o princípio da superposição, o caso real de torção poderá ser analisado.

Outros casos que serão brevemente estudados serão o carregamento lateral que ocorre numa situação de curva, e as cargas longitudinais que surgem com as desacelerações do veículo. No entanto, para fins de dimensionamento, apenas a flexão, torção pura e torção combinada com a flexão serão considerados.

Como se vê, não faz parte do escopo desse projeto uma análise dinâmica profunda, no entanto, Jason Brown ressalta que, para um projeto que esteja num estágio inicial de desenvolvimento (como no caso deste trabalho), é razoável considerar que uma estrutura veicular dimensionada adequadamente para casos estáticos extremos, utilizando o método proposto em *Motor Vehicle Structures*, estará conseqüentemente dimensionada para uma satisfatória vida de fadiga.

Para tanto, estima-se as forças equivalentes aplicadas à estrutura em diversas situações como, flexão, torção frenagem etc, multiplicando-se as cargas estáticas calculadas por um fator dinâmico de modo a adequar o estudo estático ao dinâmico, ou seja: $carga\ dinâmica = (carga\ estática) \times (fator\ dinâmico)$

A estrutura original (estrutura tubular mais chassi) possui uma massa total de 173kg (valor obtido diretamente do NX-7®). A malha unidimensional utilizada (Figura 7) para as simulações seguintes possui elementos com dimensão 15mm determinados assim por tentativas com outras dimensões e comparando-se as respostas obtidas.

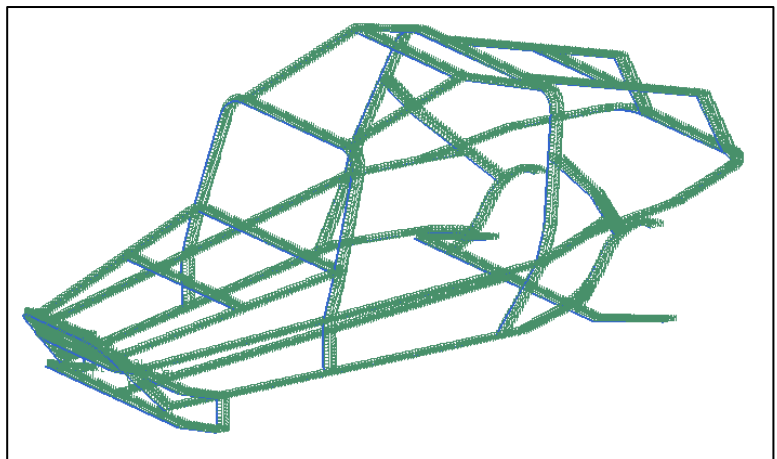


Figura 7. Malha 1D da gaiola original

7.1. Carga vertical simétrica (flexão pura)

A flexão pura do veículo ocorre quando as duas rodas de um eixo encontram um obstáculo simétrico simultaneamente, como exemplo no caso de uma lombada.

Para fins de dimensionamento (Pawlowski, 1969), para veículos fora-de-estrada, a carga de flexão que o veículo estará sujeito deve ser multiplicada por um fator dinâmico 4. Então, a flexão natural do veículo, dada pelo peso próprio da estrutura e de seus componentes, deve ser 4 vezes maior, ou seja, na simulação deverá atuar uma gravidade dada por $g' = 9,81.4 = 39,24 \frac{m}{s^2}$.

O engastamento deve ser feito de maneira que apenas a resultante no eixo Z seja diferente de 0. A representação do engastamento, bem como as respostas da simulação são apresentadas nas figuras abaixo.

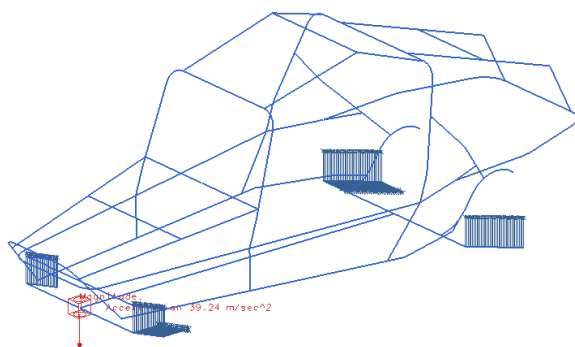


Figura 8. Carregamento na flexão pura

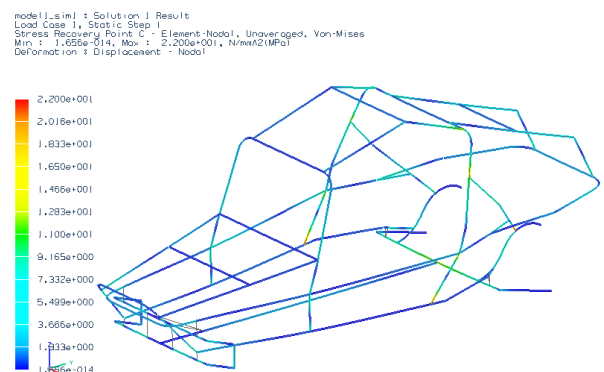


Figura 9. Tensão de Von-Mises correspondente ao ponto C na flexão

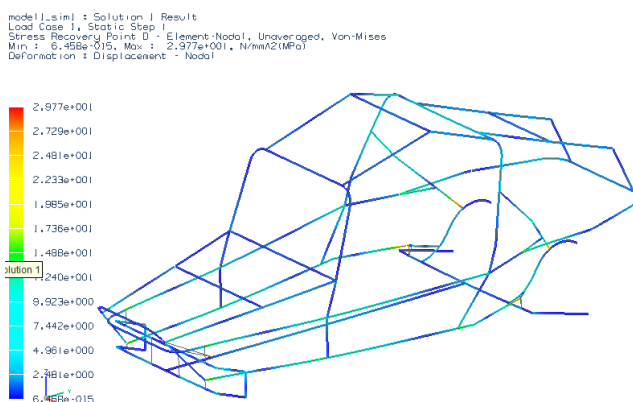
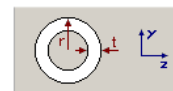


Figura 10. Tensão de Von-Mises correspondente ao ponto D na flexão

É importante ressaltar que as respostas para elementos de viga são dadas em função de determinados pontos característicos da seção transversal Figura 11. No caso da gaiola, como a seção é circular e simétrica em relação à linha elástica, as respostas são iguais duas a duas, $C=E$ e $D=F$.



$$\begin{aligned} \text{Area} &= \pi(r^2 - (r-t)^2) \\ I_z = I_y &= \pi(r^4 - (r-t)^4)/4 \\ I_{zy} &= 0 \\ K &= \pi(r^4 - (r-t)^4)/2 \\ C_w &= 0 \\ \text{Stress Recovery Point, } C_y &= r \\ \text{Stress Recovery Point, } C_z &= 0 \\ \text{Stress Recovery Point, } D_y &= 0 \\ \text{Stress Recovery Point, } D_z &= r \\ \text{Stress Recovery Point, } E_y &= -r \\ \text{Stress Recovery Point, } E_z &= 0 \\ \text{Stress Recovery Point, } F_y &= 0 \\ \text{Stress Recovery Point, } F_z &= -r \end{aligned}$$

Figura 11. Perfil circular e as posições das regiões C, D, E, F

As tensões máximas de Von-Mises obtidas e apresentadas nas Figura 9 e Figura 10 são respectivamente 22,0 MPa e 29,8 MPa. As regiões de tom mais avermelhado correspondem àquelas de maior solicitação.

Através do software também é possível obter as reações nos apoios dianteiros e traseiros. São esses, respectivamente $F'_f = 879\text{ N}$ em cada ponto da suspensão dianteira e $F'_r = 1984\text{ N}$ na roda traseira.

7.2. Carga vertical assimétrica (torção pura)

Este tipo de carregamento ocorre quando apenas uma das rodas de um eixo atinge um obstáculo. Cargas verticais assimétricas provocam tanto torção, quanto flexão pura (calculada anteriormente) à estrutura. Por esse motivo esse caso é tratado como sendo o mais severo.

A torção máxima ocorre quando uma das quatro rodas do veículo é erguida até que alguma outra das três desencoste do chão. Fazendo-se então um equilíbrio de forças a partir das dimensões do veículo obtidas anteriormente, temos que, para a gaiola nessa situação, a torção máxima sofrida é igual a 3181Nm.

Jason Brown sugere que o torque gerado nessa situação, seja aplicado à estrutura como uma torção pura, para isso a componente de flexão deve ser desprezada, deixando apenas as cargas dianteiras e traseiras de torção aplicadas em sentidos opostos. Isso pode não ocorrer na prática, contudo a torção pura é importante, pois gera esforços internos à estrutura que não ocorreriam numa situação de carregamento combinado. Para se fazer uma simulação utilizando apenas forças sem nenhum tipo de engastamento, o solver *Nx-Nastran®* apresenta uma ferramenta denominada Alívio de Inércia, utilizada para simulações de aeronaves em voo, automóvel numa pista de ensaio, ou de um satélite no espaço que permite aplicar esforços sem engastamento. Para isso *software* assume que a inércia (massa) da estrutura é usada para resistir às cargas aplicadas, ou seja, assume-se que a estrutura está em um estado de equilíbrio estático mesmo que não esteja restrita.

As figuras abaixo apresentam o modo como a estrutura foi carregada bem como as respostas de tensão de Von-Mises obtidas.

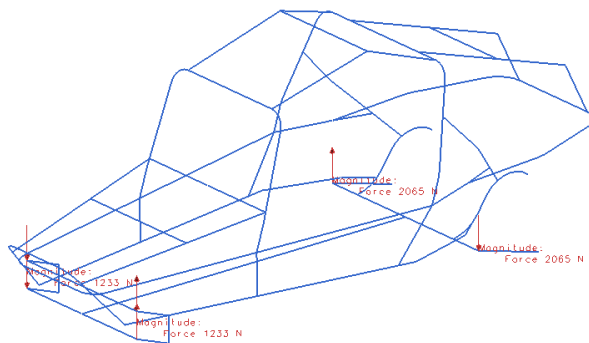


Figura 12. Carregamento na torção pura

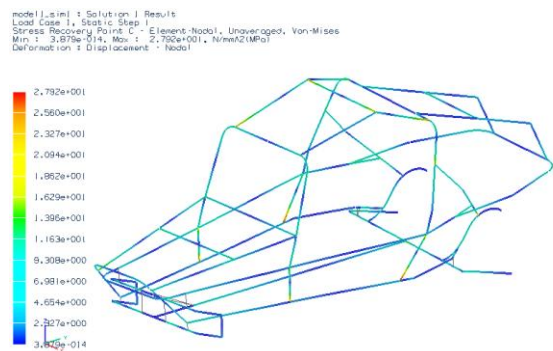


Figura 13. Tensão de Von-Mises correspondente ao ponto C na torção pura

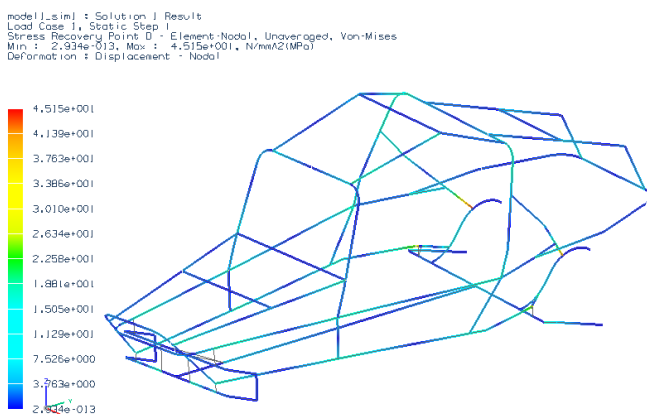


Figura 14. Tensão de Von-Mises correspondente ao ponto D na torção pura

As tensões máximas de Von-Mises obtidas e apresentadas nas Figura 13 e Figura 14 são respectivamente 28,0 MPa e 45,2 MPa

7.3. Combinação dos casos de carregamento

Combinando-se os casos de flexão pura e torção pura, determina-se o caso real de carregamento que o veículo deve sofrer em seu uso.

As figuras abaixo mostram a simulação feita para este caso.

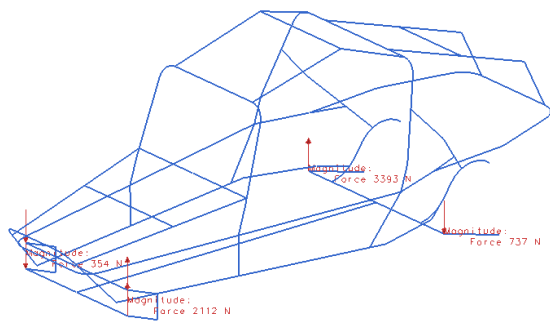


Figura 15. Carregamento combinado, torção + flexão

model[.sim] : Solution : Result
Load Case : 1, Static Step : 1
Stress Recovery Point : C - Element : Node1, Unaveraged, Von-Mises
Min : 5,725e-016, Max : 4,344e+001, N/mm2 (MPa)
Deformation : Displacement - Node1

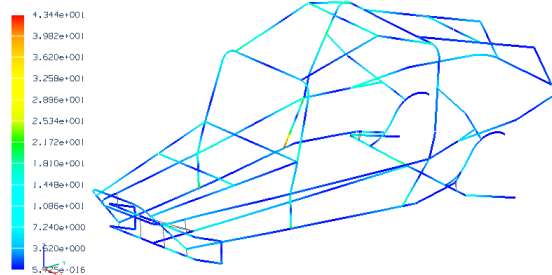


Figura 16. Tensão de Von-Mises correspondente ao ponto C na torção

model[.sim] : Solution : Result
Load Case : 1, Static Step : 1
Stress Recovery Point : D - Element : Node1, Unaveraged, Von-Mises
Min : 1,419e-014, Max : 6,441e+001, N/mm2 (MPa)
Deformation : Displacement - Node1

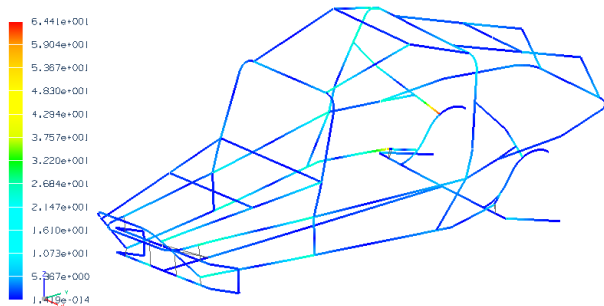


Figura 17. Tensão de Von-Mises correspondente ao ponto D na torção

As tensões máximas de Von-Mises obtidas e apresentadas nas Figura 16 e Figura 17 são respectivamente 43,4 MPa e 64,4 MPa.

7.4. Carga longitudinal de aceleração

As cargas geradas devido à aceleração, em geral, são menos relevantes frente às desacelerações numa frenagem, exceto para carros que sofram grandes acelerações súbitas, como no caso de veículos de corrida. Podem ser importantes também para o dimensionamento do cofre do motor, porém no caso da gaiola não se considera tal análise, já que, além de não se esperar acelerações elevadas, o cofre do motor deve ser retirado de outro veículo sem sofrer alterações.

7.5. Carga longitudinal de frenagem

Numa situação de frenagem haverá uma transferência de carga das rodas traseiras para as dianteiras devido à distância do centro de massa em relação ao solo. Essa transferência passa a ser relevante quando o veículo sofre desacelerações bruscas.

A equação que determina a carga no eixo dianteiro devido à transferência é a seguinte: $F'_f = Mg \cdot FD \frac{L_R + \mu h}{L}$, onde FD é o fator dinâmico (1,75 (Garrett, 1953)). Portanto tem-se:

$$F'_f = 8183,175 \frac{0,73 + 0,8 \cdot 0,62}{2,17} = 8090N$$

7.6. Cargas laterais

Basicamente duas formas de carregamento podem ocorrer numa situação de curva, uma na derrapagem (Figura 18(a)), na qual a força lateral máxima é dada por *força máxima* = μMg , onde μ é o coeficiente de atrito lateral do pneu e, no caso mais crítico, numa situação de “quase capotamento” (Figura 18(b)). Neste caso, a força lateral é máxima quando a roda “A” perder o contato com o solo. Vale ressaltar que o capotamento não ocorrerá a menos que haja energia suficiente para levar o centro de gravidade ao ponto B como mostra a Figura 18.

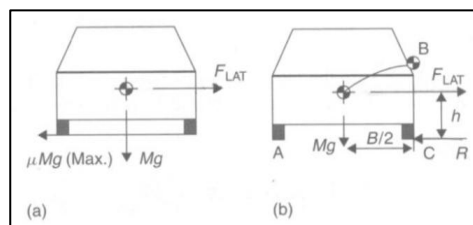


Figura 18. Carga lateral

8. Melhorias estruturais

Nota-se nas simulações anteriores, que em todos os casos, as regiões mais solicitadas são as que aparecem destacadas em vermelho na Figura 19.

Entre outros fatores, o que possivelmente causa essa sobrecarga é a falta de travamento estrutural, ou seja, a estrutura da gaiola é formada por “quadrados” (exemplificados em verde na

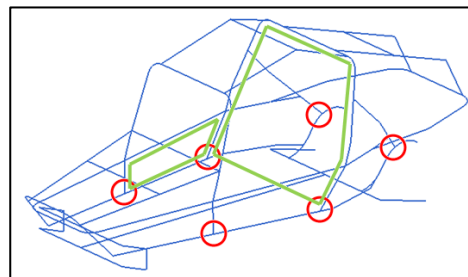


Figura 19. Regiões mais solicitação e áreas sem travamento

Figura 19) que não apresentam vigas transversais que diminuam o deslocamento torcional e conseqüentemente reduzam os esforços.

O Regulamento da competição de veículos minibaja (Regulamento XIII Baja SAE Brasil, 2007) obriga que todos os carros tenham travamento como citado anteriormente com intuito de aumento de rigidez e conseqüentemente de resistência do veículo

O primeiro passo para a redução de massa foi a mudança na área da seção transversal dos tubos. No caso deste trabalho será utilizado o mesmo perfil por toda a gaiola com o intuito de facilitar a construção de um protótipo posteriormente.

Dentre os tubos disponibilizados pela empresa *Century Tubos* (Centurytubos), após algumas simulações computacionais, selecionou-se um tubo de 1.3/8” de diâmetro com parede 1,2mm para ser utilizado em toda a estrutura.

Com essa mudança algumas regiões ultrapassaram o limite de escoamento do aço e algumas alterações foram necessárias como mostra a Figura 20.

As mudanças estruturais realizadas foram a adição dos tubos de travamento (destacadas em cinza), a elevação do tubo de escora (vermelho), e a adição do tubo para melhorar o apoio e distribuição de carga (verde). Com essas mudanças, houve redução sensível na massa total da estrutura, que chegou a 104kg, redução de 40% em relação à massa original, mantendo-se um coeficiente de segurança não menor que 2 para todos os casos de carregamento como será apresentado a seguir.

Todas as simulações computacionais feitas anteriormente para o caso da gaiola sem alterações foram realizadas novamente para o modelo apresentado na Figura 20.

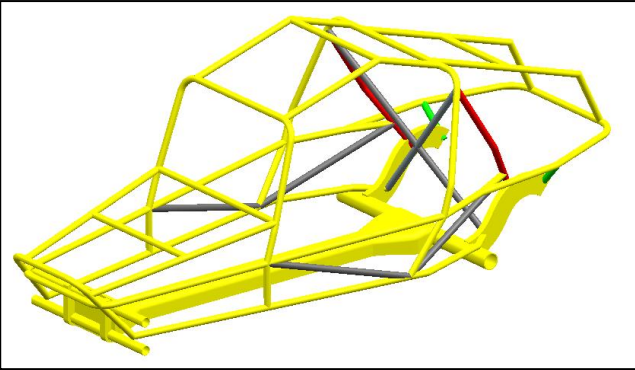


Figura 20. Configuração final da estrutura tubular

8.1. Tensões de Von-Mises

Utilizando os mesmos carregamentos apresentados nas simulações anteriores, ainda que a massa da estrutura tenha reduzido em 40%, e engastando a estrutura da mesma maneira, fez-se as simulações para o caso de flexão pura, torção pura e carregamento combinado. Os resultados obtidos são apresentados na tabela ao lado

FLEXÃO PURA	
Tensão relativa ao ponto C	33,8 MPa
Tensão relativa ao ponto D	29,2 MPa
TORÇÃO PURA	
Tensão relativa ao ponto C	85,8 MPa
Tensão relativa ao ponto D	72,0 MPa
CARREGAMENTO COMBINADO	
Tensão relativa ao ponto C	74,7 MPa
Tensão relativa ao ponto D	104,0 MPa

9. Análise da região de conexão

Análises unidimensionais não são razoáveis para a obtenção do comportamento mecânico em descontinuidades, ou seja, no caso da gaiola, as regiões de conexão entre os tubos ou dos tubos ao chassi, devem ser avaliadas mais criteriosamente.

A seguir será feito um estudo da região com maior solicitação mecânica apresentada nas simulações 1D.

Destacando-se tridimensionalmente um trecho da conexão entre tubo e chassi e conectando-se os elementos da malha do sólido aos elementos unidimensionais da curva, é possível analisar a resposta de tal região crítica. A representa o modelo a ser utilizado nas simulações. Em destaque a região objeto de estudo (região de maior solicitação mecânica).

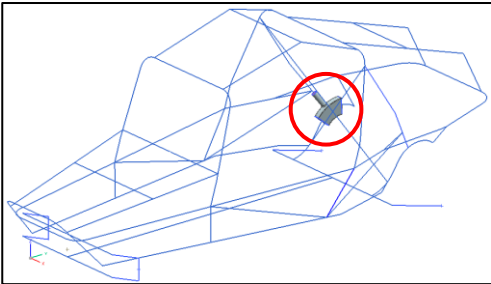


Figura 21. Modelo para análise de concentração de tensão

As Figura 22 e Figura 23 apresentam os resultados.

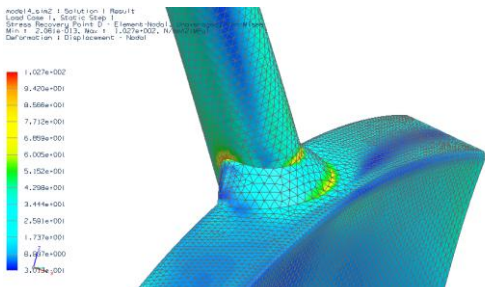


Figura 22. Resposta ao carregamento combinado - vista1

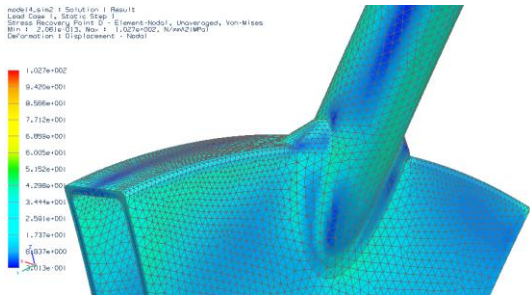


Figura 23. Resposta ao carregamento combinado - vista2

Portanto, como esperado, a região da solda concentra a tensão, porém o valor da máxima tensão de Von-Mises atinge 103MPa, ou seja, os valores obtidos anteriormente para a dimensão da estrutura não necessitam qualquer alteração.

10. Conclusão

Os objetivos pelos quais este trabalho foi desenvolvido foram alcançados na medida em que, no início apresentou-se a legislação vigente para homologação e regulamentação de veículos artesanais concluindo-se que a interferência deste item nas alterações estruturais seria nulo, bem como no estudo de ergonomia, que concluiu que o arranjo estrutural está conforme, não havendo a necessidade de mudanças para atender especificações. E finalmente num terceiro momento, a obtenção de resultados satisfatórios através das simulações estruturais que permitiram, aliado à preocupação com a não perda de resistência e não interferindo no estudo anterior de ergonomia, reduzir aproximadamente 40% de massa estrutural.

É importante ressaltar, no entanto, que as análises estruturais feitas são adequadas para o início do desenvolvimento, com elas é possível obter as características básicas do modelo. Em seguida, faz-se necessário estudos mais aprofundados que visem analisar os pontos que foram tidos como suficientemente dimensionados por extrapolação de um outro dimensionamento, como no caso de se supor que, por se usar um coeficiente dinâmico, a estrutura estaria adequada às solicitações de fadiga.

11. Referências

- DENATRAN. Apresenta resoluções do CONTRAN. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br>>. Acesso em 22 de Agosto. 2010.
- BROWN, JASON C.; ROBERTSON, A JOHN. Motor Vehicle Structure. Elsevier, 2001. 304p
- CENTURYTUBOS. Disponibiliza catálogo de tubos trefilados. Disponível em: <<http://www.centurytubos.com.br>>. Acesso em 15 de Outubro. 2010.
- GARRET, T. Automobile Dynamic Loads, Automobile Engineer. 1953.
- HIBBARD, J. Baja Bugs & Buggies. HPBooks, 1982.
- LEE, J. K., JUNG, E. S., CHUNG, M. K. An investigation of relational characteristics among the design elements of automobile occupant packaging with a triangular method. CybErg, 1999.
- PAWLOWSKI, J. Vehicle Body Engineering. Business Books, 1969.
- SAE BRASIL. Regulamento XIII Competição BAJA SAE Brasil, 2007.

12. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

PRELIMINARY DEVELOPMENT OF TUBULAR STRUCTURE FOR HANDMADE VEHICLE

Antônio Carlos Botosso

Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo
antonio.botosso@gmail.com.br

Abstract. *The Encouraged by strong growth in the automotive industry in recent years, especially the off-road segment, the present study intends to present the initial stages of the development of a special vehicle with tubular frame based on a preexisting design. The concern of the text focuses on the use of models and methods for structural analysis by computer simulation, mainly targeting the reduction of vehicle mass. The paper also presents a brief study of ergonomics of the occupants and clarifies to the reader the procedure to approval handmade vehicles in order to obtain permission for circulating on public roads.*

Keywords. *Special vehicles (Development); Vehicular structure; Finite element method*