

EDUARDO VERGINIO ZORZETO JUNIOR

*Visto.
17/12/04*

**PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM
VEÍCULO PARA COMPETIÇÃO DE AUTONOMIA**

**São Paulo
2004**

EDUARDO VERGINIO ZORZETO JUNIOR

**PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM
VEÍCULO PARA COMPETIÇÃO DE AUTONOMIA**

FICHA CATALOGRÁFICA

Trabalho de conclusão do curso de graduação do
Departamento de Engenharia Mecânica da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni

Zorzeto Junior, Eduardo Verginio
Projeto e análise estrutural de um veículo para competição
de autonomia por E. V. Zorzeto Junior. São Paulo: EPUSP,
2004. 44p.

Trabalho de conclusão de curso - Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia
Mecânica.

1. Estrutura Veicular 2. Competição 3. Métodos dos Elementos
Finitos (Simulação Computacional) 4. Combustível (Economia)
Zorzeto Junior, E. V. Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica III. I.

São Paulo

2004

Aos meus pais e avós, que me deram o amor e suporte necessários para que eu pudesse me tornar uma pessoa melhor e sempre me encorajaram a superar meus próprios limites.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu professor Ronaldo de B. Salvagni, pela paciência, apoio e orientação que possibilitaram a conclusão desse trabalho.

Ao professor Marcelo A. L. Alves, pela colaboração nos momentos difíceis da simulação computacional.

Aos meus companheiros de grupo Caio e Vicente, que também se empenharam e se dedicaram para o bom andamento do nosso trabalho e desenvolvimento do veículo como um todo, cada um em sua parte do veículo.

À minha família, pela compreensão durante todas as dificuldades surgidas nessa jornada de 5 anos, pelo amor e pelo carinho.

À minha namorada, pelo apoio nos momentos difíceis, principalmente durante a conclusão deste trabalho, e pela compreensão nas horas de ausência, dedicadas à Poli.

Aos meus amigos de faculdade, pelos bons momentos, dentro e fora da faculdade, pelas risadas, pelas horas de estudo, pelo apoio na hora de desânimo, pelas histórias, pelos apelidos mútuos, pelas partidas de paintball nunca marcadas, pelas caronas e por toda a diversão nesses últimos 5 anos, que tornaram as idas à Poli menos torturantes.

Aos amigos, por sempre me lembrarem que existe vida além Poli, a afastar da mente por breves momentos os problemas intermináveis.

À Escola Politécnica e seus funcionários, que sempre se mostram bem dispostos a colaborar com nosso desenvolvimento acadêmico.

A todas as pessoas que passaram pela minha vida, tornando possível eu ser hoje quem sou.

A todos vocês, meus mais sinceros agradecimentos e o desejo que colham todos os louros que têm sido plantados na vida de cada um de vocês.

RESUMO

O presente trabalho visa a realização do projeto básico de um veículo de baixo consumo, estudando os principais fatores responsáveis pelo gasto de combustível e o desenvolvimento de métodos e técnicas para minimizar os efeitos destes fatores. A intenção é dar um primeiro passo para a construção do veículo que irá representar a Escola Politécnica em uma futura competição de autonomia, competição esta realizada a décadas na Europa e pela primeira vez no Brasil este ano. O projeto foi realizado em grupo, e foi dividido em três (3) sistemas: estrutura, trem de força e aerodinâmica. Este trabalho contém o desenvolvimento da estrutura do carro, sendo visto em detalhes as normas do regulamento que foram seguidas, a seleção de material, a síntese e análise numérica, através do Método dos Elementos Finitos, da parte estrutural do veículo, definindo suas dimensões, e feitas considerações construtivas do mesmo, de modo a otimizar a relação entre peso e resistência, reduzindo a massa do mesmo e, conseqüentemente, o consumo de combustível nas acelerações, mantendo sempre a compatibilidade com os demais sistemas; em paralelo outro grupo estará desenvolvendo a parte aerodinâmica e de trem de força. A configuração selecionada possui duas (2) rodas na parte da frente, para direção, e uma (1) na parte de trás, sendo esta a motora; a estrutura é de vigas tubulares circulares (ocas), de 1 polegada de diâmetro externo e 1,6 mm de espessura de parede; o material selecionado foi o alumínio, com o qual a estrutura ficou com a massa de 4,5 kg, maior deslocamento nodal de 19,2 mm e tensão máxima de viga de 133,7 MPa. Essa massa final cumpriu com os objetivos de minimização de massa e ficou muito próxima aos resultados divulgados dos veículos das competições acima mencionadas. Fica a ressalva quanto a possível aplicação de coeficientes de segurança a esses resultados, sendo tido como medida preventiva contra carregamentos indesejáveis e, de certo modo, imprevisíveis, relacionados ao transporte do veículo, dentro de caminhões, por vias urbanas, ou mesmo quanto a colisões durante as provas.

ABSTRACT

This report regards the basic project of a fuel-economy vehicle, studying the main factors responsible for fuel expense and developing methods and techniques to downsize their effects. It is to be the first step towards the construction of a car to be the Escola Politécnica's representative in a future autonomy competition, which has been happening in Europe for decades, and for the first time in Brazil earlier this year. The whole project was accomplished in a team, three people, being split in three (3) different systems, each of them designed by a different member of the team: structure, power train and aerodynamics. In this paper the car's structure only is designed, in a detailed approach of the rules that were followed, the material selection, and the car's structure's synthesis and numerical analysis, through the Finite Elements Method, defining the dimensions, and some considerations regarding the vehicle construction, as a way to optimize the weight-resistance rate, minimizing its weight and, as consequence, its inertia, the fuel consumption during accelerations, always keeping the compatibility among the systems; the others two members are developing their systems in parallel. The selected configuration has two (2) wheels at front, for steering, and one (1) in the back, for motion; the structure is made of pipe beams (circular and hollow), 1 (one) inch outside diameter and 16 (sixteen) mm wall thickness; aluminum is the material, resulting in a 4,5 kg weight, having 19,2 mm as maximum displacement and 133,7 MPa as maximum strength. This weight matched the team's goal, and it is close to the European cars' published data. One concern is raised yet regarding the possibility of adding some safety coefficients to these results, as a preventive measure against unpredictable and/or unwanted impacts, due to its transportation inside a truck, or even in a race collision, to be evaluated by the team to be participating on the future competition.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. COMPETIÇÃO.....	2
3. PESQUISA.....	6
4. PROJETO DA ESTRUTURA	8
4.1. Introdução.....	8
4.2. Seleção do Material.....	10
4.2.1. Fundamentação Teórica	10
4.2.2. Escolha do Material	12
4.3. Análise Estrutural	17
4.3.1. Considerações Iniciais.....	17
4.3.2. Fundamentação Teórica	18
4.3.2.1. Método dos Elementos Finitos	18
4.3.2.2. Resistência dos Materiais	20
4.3.3. Simulações.....	23
4.3.3.1. Dimensões do veículo	23
4.3.3.2. Cargas Aplicadas.....	24
4.3.3.3. Metodologia Aplicada às Simulações	24
4.3.3.4. Alternativas para teste.....	26
5. CONSIDERAÇÕES SOBRE FABRICAÇÃO E MONTAGEM.....	41
6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS	42
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Índices de Performance para minimização da massa.....	p13
Tabela 4.2: Propriedades dos materiais escolhidos.....	p16
Tabela 4. 3 List all selected keypoints.....	p27
Tabela 4. 4 List all selected lines.....	p28
Tabela 4.5 Resultados da simulação.....	p28
Tabela 4. 6 List all selected keypoints.....	p30
Tabela 4.7 List all selected lines.....	p30
Tabela 4.8 Resultados da simulação.....	p33
Tabela 4.9 Resultados da simulação.....	p33
Tabela 4.10 Posição dos nós no espaço (em mm).....	p34
Tabela 4.11 Deslocamentos dos nós no espaço (em mm).....	p36
Tabela 4.12 Tabela de cálculo de massas e força crítica de flambagem.....	p39

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: modelo R6B.....	p07
Figura 3.2: modelo Bath A.....	p07
Figura 4.1: Carta de Seleção de Materiais Modulo de Young x Densidade.....	p14
Figura 4.2: Carta de Seleção de Materiais: Tensão x Densidade.....	p15
Figura 4.3: Brainstorm de configurações.....	p26
Figura 4.4 Tensão nos elementos de viga.....	p29
Figura 4.5 Vetores de deslocamentos nos elementos de viga.....	p29
Figura 4.6 Tensões nos elementos de viga.....	p31
Figura 4.7 Vetores de deslocamentos nos elementos de viga (isométrica).....	p32
Figura 4.8 Vetores de deslocamentos nos elementos de viga (lateral).....	p32
Figura 4.9 Vetores de deslocamentos nos elementos de viga (frontal).....	p33

1. INTRODUÇÃO

Realizada desde a década de 80 na Europa, a Eco-Marathon, competição de autonomia entre veículos do mundo todo, teve sua primeira versão brasileira da competição realizada em 30 de julho de 2004, organizada pela CBA, envolvendo faculdades de engenharia de todo o país, a prova foi chamada de Maratona da Natureza.

Visando dar um primeiro passo para a construção do veículo que irá representar a Escola Politécnica em uma futura competição, este trabalho irá conter a concepção do carro, sendo retratado com maior detalhe seus principais sistemas, gerando desenhos e planilhas que poderão ser utilizados como base por uma possível equipe a ser formada pela escola.

Trata-se de um trabalho em grupo, onde principal objetivo a ser alcançado é a realização do projeto básico de um veículo de baixo consumo, estudando os principais fatores responsáveis pelo gasto de combustível e o desenvolvimento de métodos e técnicas para minimizar os efeitos destes fatores.

O projeto foi então dividido em três partes a serem desenvolvidas em paralelo, uma por cada membro do grupo, seguindo uma espiral de projeto até sua concepção final:

- Trem de força → A principal perda de energia relaciona-se com este item (rolamento), um estudo detalhado de cada item terá grande influência no nosso desempenho. Serão realizados análise, dimensionamento e seleção dos seguintes itens: motor, embreagem, transmissão, acoplamentos, suspensão, pneus e freios.
- Estruturas → Análise, dimensionamento e seleção da estrutura a ser utilizada e selecionar o melhor material visando otimizar a relação peso e resistência.
- Aerodinâmica → Análise do escoamento ao redor de diversas configurações e veículos, verificando a influência das rodas e do chão no arrasto. Selecionar o material a ser utilizado na construção da carcaça verificando a importância desta no projeto final.

Vale ressaltar que um possível sistema eletrônico de controle do motor não será objetivo de estudo de nenhum dos três integrantes do grupo.

2. COMPETIÇÃO

Desde 1985 acontece na França a **Shell Eco-marathon**, uma competição onde escolas e Universidades têm que projetar e construir veículos que consumam o mínimo possível de combustível, e depois colocá-los em uma corrida. Nessa competição existem várias categorias e pode-se escolher entre 4 (quatro) tipos de fonte de energia: gasolina, diesel, GLP e fontes de energia alternativa.



O recorde atual para veículos a gasolina é de 3.494 km/l, obtido pelo Paul Sabatier University/INSA Toulouse em 2002, com a média de 25km/h, antes de entrar em vigor o limite mínimo de 30 km/h.



O foco das escolas para garantir boa colocação na competição não fica apenas na motorização, mas também na otimização da aerodinâmica, dos pneus, redução de perdas de energia por atrito, da eletrônica e estratégia de prova.

O objetivo maior da competição é incentivar a pesquisa de novas tecnologias e soluções técnicas que visem a preservação do meio ambiente e utilização de combustíveis alternativos, de maneira economicamente viável.

Abaixo um resumo das regras obrigatórias da competição, para a categoria mais próxima à competição brasileira, para o ano de 2004:

- O veículo deve possuir de 3 a 4 rodas;
- A altura máxima é 1,25 X a distância entre as rodas do eixo mais largo;
- Não é permitido que o piloto esteja posicionado com a cabeça a frente do corpo;
- Deve-se ter 180° de capacidade de visibilidade sem o auxílio de aparelhos;
- O veículo deve conter 2 retrovisores externos com área mínima de 25 cm² cada;
- A distância entre rodas deve ser no mínimo de 500 mm e no máximo de 1100mm;
- Ventilação deve ser adequada e o veículo deve possuir sunscreen;
- A distância entre eixos deve ser de 1000 mm;
- Chassis e carroceria devem ser rígidos (sólidos);

- Sto. Antonio deve ser mais largo que o ombro dos pilotos em 50 mm acima do capacete, agüentar 70 kg estáticos, sem dobrar, e deve haver proteção contra batidas laterais;

- 100 mm entre o pé do piloto e a parede interna;
- Cinto de segurança de 4 pontos e preso na estrutura com fivela de metal;
- Piloto deverá ser capaz de sair do veículo sem auxílio a qualquer hora; sua posição tem que ser facilitada para momentos de emergência;

- A porta devera abrir por fora e por dentro, sinalizada por fora com uma seta vermelha e explicando como abrir a porta;

- É proibido o uso de fita adesiva para reforçar a porta;

- A buzina deve ser escutada a uma distancia de 5 metros com o carro em funcionamento;

- Rodas de bicicleta e moto devem ser analisadas antes de usadas;

- Recomenda-se cuidado para distribuição de cargas (não pode ser somente em 1 lado);

- Proteção para rodas (anteparo), para não haver contato com o motorista;

- Raio de curva de 6 metros;

- Precisão nas curvas;

- 2 sistemas de freios independentes (hidráulico ou a disco) que agüentem 20% de inclinação imóvel (cada freio será testado individualmente), e descer de uma rampa e parar em alguns metros;

- Dutos de exaustão não podem passar a parte traseira do carro;

- Abafadores não são obrigatórios;

- Piloto deverá ter mais de 13 anos e 45 kg;

- O piloto deverá ser capaz de identificar um objeto de 100mm de altura a 3000mm de distancia da frente do veiculo;

- Capacete e roupa adequados e aprovados pela organização;

- Tanque visível para fora do veiculo;

- Luz para quando o motor estiver desligado;



Baseada na competição francesa, neste ano de 2004 aconteceu a **1ª Maratona da Natureza**, que foi a primeira competição desse tipo realizada no Brasil, onde o único tipo de fonte de energia permitido é a gasolina, e contendo apenas uma categoria única, diferentemente da Eco-marathon. A intenção é tornar a competição anual a partir de agora.

Ao todo participaram equipes de seis faculdades e universidades de todo o país, com veículos projetados e construídos por seus professores e alunos, e a equipe vencedora marcou 151,2 km/l.

A Escola Politécnica não participou desta edição do evento, servindo este presente trabalho de formatura como iniciativa para a criação de equipes para participar das próximas edições.

Abaixo um resumo do Regulamento Técnico da competição:

- Dimensões mínimas: largura = 0,5m; distância entre eixos = 1,0m;
- Largura máxima: 1,1 m;
- Motor será cedido pela organização, utilizando gasolina comercial, ciclo Otto;
- Preparação do motor e seu deslocamento volumétrico são livres;
- Tubulação de exaustão para fora do veículo;
- Motor de partida não pode ter torque suficiente para mover o veículo;
- Freios duplos, de atuação independente;
- Sistema de direção permitir ao veículo um diâmetro de giro mínimo de 10 m;
- Parede anti-fogo selando totalmente o habitáculo da compartimento do motor;
- Arco de proteção (Santo Antônio) atrás da cabeça do piloto, que suporte uma carga de 70 kg aplicada na vertical, de cima para baixo;
- Piloto deve ter visão de 90° de visibilidade para cada lado;
- Espelhos retrovisores (2);
- Piloto deve ser capaz de abrir pára-brisa (se houver) sem ajuda externa;
- Não é permitido o uso de parte aerodinâmicas móveis;

- As rodas que forem embutidas na carroceria devem ser separadas do piloto por proteção;

- Não deve haver arestas agudas ou pontas aparentes internamente ao veículo;
- Ter 3 ou 4 rodas;
- O piloto deve ser capaz de dar a partida no motor sem ajuda externa;
- Duas chaves gerais, uma interna e outra externa;
- Uso de capacete de segurança homologado.

3. PESQUISA

Foram realizadas pesquisas na internet sobre os modelos utilizados atualmente na competição europeia e também uma visita à FEI (Fundação Educacional Inaciana, antiga Faculdade de Engenharia Industrial) orientada pelo professor Ricardo Bock, nas quais foi possível detectar certas semelhanças estruturais e na motorização dos protótipos participantes, além das premissas e objetivos que aspiram tais projetos.

Constatou-se que a principal característica comum a todos os veículos era em relação ao peso, sendo este minimizado ao máximo. Outro ponto comum entre os carros vencedores era um pesado sistema de controle eletrônico do motor. A estratégia básica consistia em fazer o carro ganhar velocidade por alguns instantes e em seguida deixá-lo ser levado por inércia até que este atinja velocidade inferior a um dado valor especificado, quando é novamente acelerado. Alguns veículos com esse tipo de controle ultrapassam a marca de 1000 km/l.

Competidores que mantêm o motor solicitado de forma contínua, mesmo que em faixa ótima de funcionamento, em boas condições conseguem por volta de 300 a 400 km/l.

A aerodinâmica pode ou não ser crucial, dependendo da velocidade ao qual o veículo é submetido. Algumas equipes prezam a aerodinâmica enquanto outras visam a aparência e o visual do carro.

No geral percebe-se que os veículos são de construção aparentemente simples, sem os complicados sistemas encontrados hoje nos carros de passeio, sendo todos bastante semelhantes entre si, com diversas particularidades em comum listadas abaixo:

- Utilização de materiais leves, geralmente alumínio em sua estrutura e fibra de carbono ou vidro em sua carroceria. Peso entre 35 – 50 kg;
- Pilotos leves, geralmente com menos de 50 kg;
- Conjunto de três rodas, duas na frente e uma atrás;
- Sistema de direção simples e frontal (rodas dianteiras);
- Propulsão traseira;

- Sistema de suspensão inexistente;
- Freio a disco, de acionamento hidráulico na Europa e mecânico no Brasil;
- A área frontal é menor do que $0,40 \text{ m}^2$;
- O coeficiente de arrasto é por volta de $0,1-0,2$;
- Embreagem centrífuga e transmissão por corrente;
- Pneus fornecidos pela Michelin na Europa e de bicicleta no Brasil;



Figura 3.1: modelo R6B



Figura 3.2: modelo Bath A

4. PROJETO DA ESTRUTURA

4.1. Introdução

Este presente trabalho de formatura trata de apenas umas das três partes em que o projeto do veículo foi dividido: o projeto da estrutura do veículo.

Vale ressaltar que esta parte foi desenvolvida em paralelo com os outros dois integrantes do grupo, sendo de máxima importância a compatibilidade entre as partes, verificada durante todo o desenvolvimento do projeto.

O projeto da estrutura visou diminuir ao máximo a massa do veículo, reduzindo assim sua inércia, mas sendo mantida uma resistência mínima para suportar o peso do piloto e possíveis esforços externos, durante a corrida, como batidas e imperfeições da pista, ou fora dela, como durante o transporte do veículo.

A redução da inércia mostra-se relevante na hora da largada, a primeira aceleração do veículo, pois a força necessária para acelerar um veículo é menor quanto mais ele leve for, e com isso, menos é exigido do motor e menor o consumo; durante a corrida, se mantida a velocidade constante, a inércia passa a ser irrelevante.

Porém, caso a estratégia da equipe seja diferente, essa redução da inércia torna-se de vital importância. Caso a estratégia adotada seja a de manter o motor funcionando em uma faixa ao redor do ponto ótimo de consumo (eletronicamente ou manualmente), por exemplo. Define-se uma faixa de velocidades (velocidade máxima e mínima), e desliga-se o motor ao atingir o limite superior de velocidade, e, conforme o carro perde velocidade, religá-lo ao alcançar a velocidade limite inferior, passando a haver seguidas acelerações durante o percurso, multiplicando o efeito de economia de combustível.

Nesse caso passa a ser de vital importância também um estudo mais aprofundado dos efeitos de redução de massa, mais relacionado à desaceleração do veículo. O veículo tendo menor massa, igual menor inércia, também desacelera mais rapidamente, quando o desejado é que ele mantesse a velocidade o maior tempo possível, e isso poder fazer com que o ciclo de aceleração-desaceleração tenha uma frequência muito alta, dificultando o controle, por causa do tempo de resposta, e aumentando o consumo, pois

a partida do motor seria acionada constantemente. É de interesse da equipe que venha a construir o carro no futuro encontrar um ponto ótimo para essa questão.

Não será mencionado neste trabalho a influência da massa, peso ou inércia sobre os outros fatores de desempenho do carro, ficando a cargo da parte de Aerodinâmica e Trem de Força fazê-los de maneira e em local apropriados.

Durante o desenvolvimento do projeto foi selecionado o material a ser utilizado, sendo feita uma análise de viabilidade, tendo o custo e a disponibilidade de mercado dos elementos como fatores de decisão; e escolhida e analisada a forma mais adequada para o chassis que vá de encontro com as regras estabelecidas pela organização da competição (listadas no capítulo 2, “Regulamento Técnico” da competição brasileira) e com os parâmetros definidos pelo grupo durante a pré-concepção do veículo como um todo. São eles:

- Minimizar massa total do veículo (objetivo: abaixo dos 35 kg);
- Piloto(a) de altura inferior a 1,60 m e pesando por volta de 45 kg ou menos;
- Haver um mínimo de conforto necessário para o piloto;
- Ser compatível construtivamente com as definições finais de Trem de força e da carroceria (aerodinâmica);
- Possuir 3 (três) rodas (uma atrás, de tração, e duas a frente, de direção);
- Deformação máxima da linha elástica nos pontos de interferência com Trem de Força e a carroceria (bolha aerodinâmica) de 15 mm; nos outros pontos, 30 mm.

4.2. Seleção do Material

Busca-se, através da seleção do material, definir qual o material que melhor se adapta às necessidades do projeto.

Ficou pré-definido pelo grupo, após análise de carros de outras competições, conversas com professores da Escola da área de materiais e pesquisa de disponibilidade de mercado, que o chassi do veículo seria composto por vigas de seção circular, possivelmente oca (anel circular), que é um elemento simples e também largamente utilizado no mercado.

Como característica principal tem-se a minimização da massa, baseado na otimização (redução) da seção transversal dessas vigas, sem que haja comprometimento da resistência da estrutura (rigidez), e seguindo o parâmetro de deformação máxima da linha elástica definido no item anterior.

4.2.1. Fundamentação Teórica

Elementos estruturais são componentes que executam uma função estrutural. Entre suas funções estão: suporte de carregamentos, transmissão de calor, armazenamento de energia, entre outros; ou seja, eles têm que satisfazer *Requisitos Funcionais*, como um carregamento específico em um determinado elemento, ou uma dada quantidade de energia a ser armazenada por uma mola. Isso mostra que os requisitos funcionais são externos ao elemento.

O projeto de um elemento estrutural é especificado por três grupos: os requisitos funcionais, a geometria e as propriedades do material com que é feito. O desempenho do elemento é descrito por uma equação do tipo:

$$p = f \left[\left(\begin{array}{c} \text{Requisitos} \\ \text{Funcionais, F} \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} \text{Parâmetros} \\ \text{Geométricos, G} \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} \text{Propriedades} \\ \text{do Material, M} \end{array} \right) \right] \quad (4.1)$$

$$\text{ou} \quad p = f(F, G, M) \quad (4.2)$$

onde p descreve os aspectos de desempenho do componente, como massa, volume, custo ou vida, por exemplo; e “f” significa “função de”. O projeto otimizado é a seleção do material e geometria que maximizem ou minimizem p , de acordo com a necessidade, e cada uma dessas variáveis (grupos) é chamada de *índice de desempenho*. A experiência mostra que esses grupos são usualmente separáveis. Neste capítulo, obviamente, a variável de interesse para estudo é a variável M , com relação às propriedades do material.

A metodologia consiste em escolher uma equação que envolva a propriedade que se deseja maximizar ou minimizar e isolá-la do lado esquerdo da equação (o p da equação (4.1)). Então, utilizando-se de outras equações vindas da Resistência dos Materiais, substituir os elementos do lado direito da equação de modo resultar em uma equação do tipo da equação (4.1), que possa ser possível visualizar os elementos nos três grupos mencionados anteriormente. De posse da função relativa a M , utiliza-se as Cartas de Seleção de Materiais para selecionar o material, ou família de matérias, que melhor cumpre com os parâmetros do projeto.

Pela relação matemática obtida (M), seleciona-se a Carta com as propriedades convenientes, e pode-se plotar uma reta onde essa relação é constante, ou seja, uma reta que indica os materiais que possuem o mesmo valor para a relação estabelecida. Na verdade obtêm-se famílias de retas paralelas, cada uma delas indicando um valor constante para a relação estabelecida. Qualquer material que se encontra acima dessa paralela se adequa melhor à característica buscada, abaixo, pior. Pode-se utilizar também o cruzamento de informações nessas cartas, assim estabelecendo “zonas de materiais permitidos”. Por exemplo, após manipulação das equações, deseja-se maximizar a relação $\rho/E^{1/3}$, e deseja-se um material Coeficiente de Elasticidade, E , maior que 100 GPa. Nesse caso, na carta onde estão plotados $E \times \rho$, a região de interesse passa a ser dos materiais que se encontram acima da linha que delimita materiais com $E > 100\text{GPa}$, e mais acima da família de retas que representam $\rho/E^{1/3}$.

4.2.2. Escolha do Material

No projeto da estrutura do veículo o fator que se deseja minimizar é a massa de uma viga circular. Seguindo o desenvolvimento de ASHBY, M. F., em *Materials Selection in Mechanical Design* (1992), tem-se:

$$m = Al.\rho \quad (4.3)$$

onde: **m** = massa;

A = área da seção transversal;

l = comprimento da viga;

ρ = densidade do material;

O comprimento da viga (**l**) e o carregamento aplicado (**F**), uma vez definidos, não podem ser alterados, ou seja, deixam de ser considerados variáveis. O raio é livre. A seção deve, no entanto, ser suficiente para suportar o carregamento (**F**), ou seja:

$$F \leq \frac{F_{crit}}{S_f} = \frac{n.\pi^2.E.I}{l^2.S_f} = \frac{n.\pi^2.E}{S_f.I^2} \left(\frac{\pi.r^4}{4} \right) \quad (4.4)$$

onde **F** = carregamento aplicado;

F_{crit} = carregamento crítico (carregamento que leva ao colapso da estrutura);

S_f = fator de segurança;

n = coeficiente que depende dos vínculos do elemento;

E = módulo de Young;

I = momento de inércia = $\pi.r^2/4 = A^2/4\pi$;

Usando a equação (4.4) para eliminar a área A na equação (4.3), tem-se:

$$m = 2.(S_f.F)^{1/2} \left(\frac{l^4}{n.\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (4.5)$$

Ou seja:

$$M = \frac{\rho}{E^{1/2}} \quad (4.6)$$

Da tabela retirada do mesmo livro mencionado ("ASHBY, M. F., em **Materials Selection in Mechanical Design**. Oxford: Pergamon Press, 1992. 311p), tem-se também a relação que minimiza a massa para máxima tensão:

Tabela 4.1: Índices de Performance para minimização da massa.

<i>Performance Indices (a) Minimum Weight (Cost, Energy¹) Design</i>		
Component shape and loading ²	Stiffness design: Maximise	Strength design: Maximise
<i>Tie (tensile strut)</i> load, stiffness, length specified, section area free	E/ρ	σ_f/ρ
<i>Torsion bar or tube</i> torque, stiffness, length specified, section area free	$G^{1/2}/\rho$	$\sigma_t^{1/2}/\rho$
<i>Beam</i> loaded externally or by self-weight in bending; stiffness, length specified, section area free	$E^{1/2}/\rho$	$\sigma_f^{1/2}/\rho$
<i>Column (compression strut)</i> failure by elastic buckling or plastic compression; collapse load and length specified, section area free	$E^{1/2}/\rho$	σ_f/ρ
<i>Plate</i> loaded externally or by self weight in bending; stiffness, length, width specified, thickness free	$E^{1/3}/\rho$	$\sigma_f^{1/2}/\rho$
<i>Plate</i> loaded in-plane; failure by elastic buckling or plastic compression; collapse load, length and width specified, thickness free	$E^{1/3}/\rho$	σ_f/ρ
<i>Rotating disks, flywheels</i> energy storage specified	—	σ_f/ρ
<i>Cylinder with internal pressure</i> elastic distortion, pressure and radius specified; wall thickness free	E/ρ	σ_f/ρ
<i>Spherical shell with internal pressure</i> elastic distortion, pressure and radius specified, wall thickness free	$E/(1-\nu)\rho$	σ_f/ρ

Notes:

¹ To minimise **cost**, use the above criteria for minimum weight, replacing density ρ by $C\rho$, where C is the cost per kg. To minimise **energy content**, use the above criteria for minimum weight replacing density ρ by $q\rho$ where q is the energy content per kg.

² E = Young's modulus; G = shear modulus; σ_f = failure strength; ρ = density.

Ou seja, tem-se também a relação:

$$M = \frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho} \quad (4.7)$$

Utilizando as cartas de seleção de materiais apropriadas, tem-se, para a maximizar a equação (4.6):

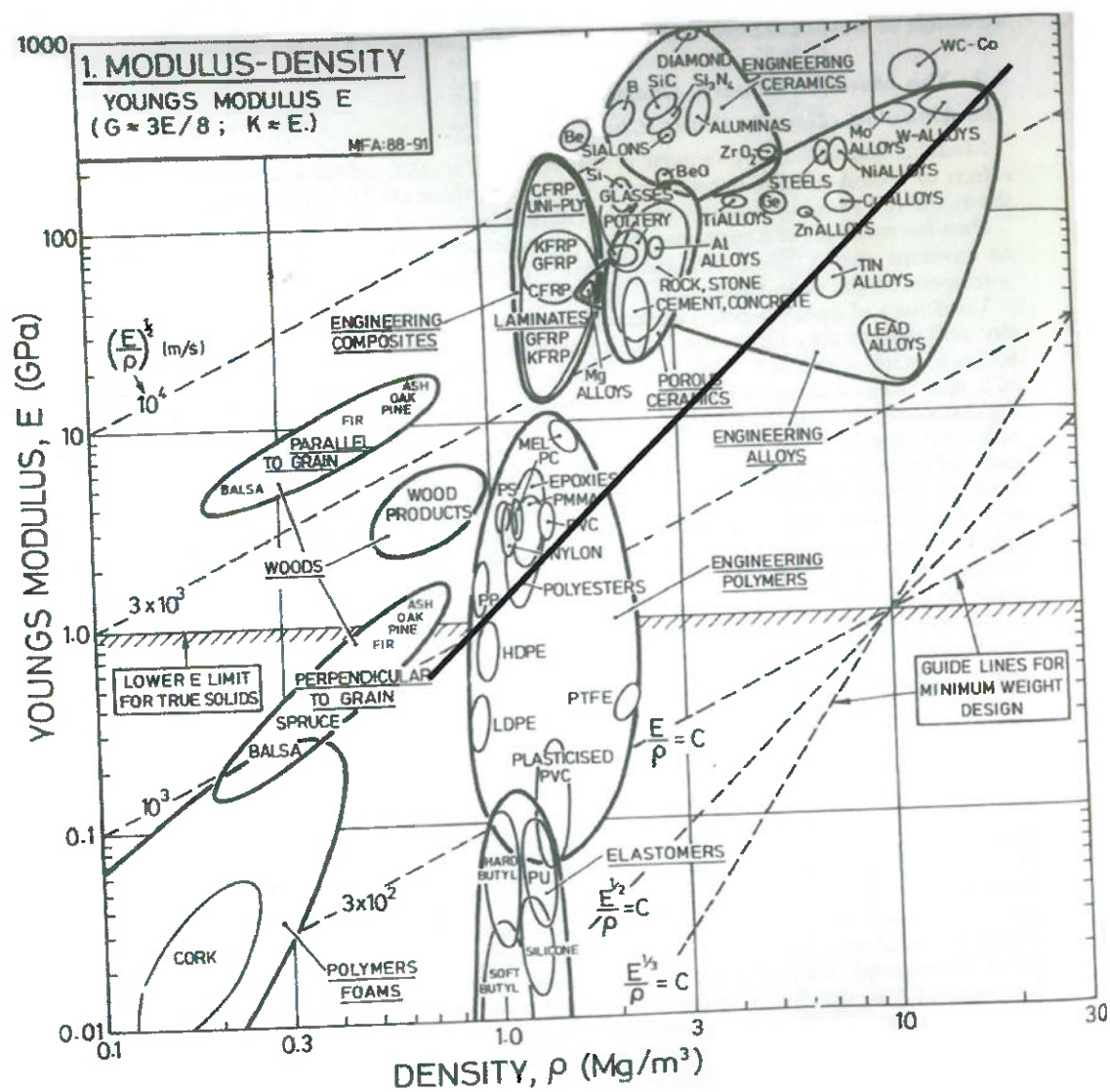


Figura 4.1: Carta de Seleção de Materiais Módulo de Young x Densidade

No cruzamento do resultado das duas cartas, tem-se, então, na ordem:

- **Madeiras:** descartada, devido à difícil obtenção de homogeneidade do material, especialmente em vigas de diâmetros reduzidos, como é o caso, reduzindo demasiadamente sua confiabilidade;
- **Cerâmicas de Engenharia:** descartadas, devido a sua alta fragilidade e baixa resistência a flexão;
- **Vidros:** descartados, também devido a sua alta fragilidade e baixa resistência a flexão;
- **Pedras, cimento e concreto:** descartados, pelos mesmos motivos apresentados para as cerâmicas;
- **Ligas de Alumínio, Ligas de Titânio e Aços:** as Ligas de Titânio foram descartados devido a dificuldade de obtenção e alto custo; as ligas de alumínio e os aços, de alta tensão de escoamento, serão os materiais estudados, utilizados nas simulações para que um seja escolhido ao final do projeto.

Tabela 4.2: Propriedades dos materiais escolhidos

	Módulo de Young (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Densidade (kg/m³)
Aço 1020	206	296	7850
Aço 1040	206	351	7850
Aço 4340	206	482	7850
Alumínio	70	250	2715

4.3. Análise Estrutural

4.3.1. Considerações Iniciais

Das três partes em que foi dividido este projeto, é a parte de estruturas a que mais tem interação com as outras duas. A estrutura que servirá de apoio tanto para os itens do Trem de força quanto para a carroceria, é onde tudo será montado. Daí sua dependência perante as duas outras partes, ou a dependência delas em relação à estrutura. Para evitar que surjam problemas nesse quesito, na pré-concepção do veículo algumas dimensões já foram definidas, e outras já estimadas, tentando se aproximar o máximo possível dos valores finais, para evitar voltas desnecessárias na espiral de projeto.

Foram dimensionadas a altura e largura básicas do carro, de modo a seguir as regras impostas pela competição brasileira, e para o posicionamento do(a) piloto; foi feita a análise e dimensionamento para uma pessoa de 1,60 m poder dirigir sem problemas de ergonomia. Como resultado, na região do piloto, 800 mm de altura e 700 mm de largura.

O comprimento do carro inicialmente foi apenas estimado, devido às indefinições da parte de Trem de força e da de aerodinâmica, em 2600 mm, sendo 2000 mm de entre eixos. E a partir dessas dimensões e limitações do regulamento, a estrutura começou a ser concebida, e acabaram por se demonstraram acertadas, como pode ser visto no trabalho dos outros dois membros do grupo inicial, principalmente para a redução do coeficiente de arrasto aerodinâmico.

A análise estrutural foi feita em um software de Elementos Finitos, o **ANSYS/ED Test Drive 5.3**, sua versão Demo, onde foi utilizado o elemento de viga, que é um elemento simples, mas robusto o bastante para esse tipo de projeto.

4.3.2. Fundamentação Teórica

4.3.2.1. Método dos Elementos Finitos

A análise estrutural refere-se a uma classe de problemas da mecânica dos meios contínuos. Para a maioria dos casos essa análise torna-se relativamente simples, lançando-se mão da teoria da Resistência dos Materiais (ou Mecânica dos Sólidos), com suas hipóteses e simplificações, e adotando-se as corretas condições de contorno e/ou iniciais associadas ao problema. Entretanto quanto mais complexo for o problema, mais difícil torna-se sua resolução, e a obtenção de uma solução exata exige simplificações e hipóteses cada vez mais exageradas, correndo o risco de se afastar demasiadamente o modelo utilizado do fenômeno real.

Com o avanço da tecnologia dos processadores e computadores digitais, foram desenvolvidos programas que obtêm soluções numéricas aproximadas para esse tipo de problema, baseados em métodos matriciais, entre eles o Método dos Elementos Finitos. Vale ressaltar que apesar de ser uma ferramenta de análise poderosa, se não utilizada cuidadosamente e corretamente, pode fornecer resultados incorretos, por isso é recomendável a utilização de métodos de análise diferentes, garantindo maior confiabilidade para os resultados obtidos. Em outras palavras, esse tipo de programa não deve ser utilizado às cegas, como uma caixa preta, pois acaba por potencializar a capacidade de resolução do problema, para o certo ou para o errado; deve-se ter uma boa idéia dos resultados esperados, pela resolução do problema por um modelo mais simplificado, por exemplo, para que se possa comparar com os resultados finais, evitando problemas ou surpresas futuras.

Os programas de modelagem por Elementos Finitos podem resolver numericamente uma variedade de problemas mecânicos. Entre eles: análise estrutural estática/dinâmica (linear ou não linear), problemas de transferência de calor e fluidos, problemas de acústica e eletromagnética.

A metodologia utilizada é a divisão da estrutura, por meio de linhas ou superfícies imaginárias, em pequenos elementos (“elementos finitos”), onde esses elementos estão interligados por um número discreto de pontos nodais situados em suas fronteiras. Conjuntos de funções são selecionadas para definir univocadamente, dentro de cada “elemento finito”, seus deslocamentos e, conseqüentemente, suas tensões.

Esse processo envolve várias aproximações, como, por exemplo, para garantir a continuidade das funções de deslocamento entre elementos contíguos; ou a utilização de cargas nodais equivalentes, satisfazendo as condições de equilíbrio apenas num modo geral.

Em geral, a solução por elementos finitos pode ser dividida em três etapas:

- 1) **Pré-processamento:** definição do problema, onde as etapas principais são:
 - Definição de pontos/áreas/volumes;
 - Definição do tipo de elemento, material e propriedades geométricas;
 - União de linhas/áreas/volumes, conforme o problema.
- 2) **Solução:** aplicação de carregamentos (pontuais ou distribuídos), vinculações (translacionais e rotacionais) e resolução do conjunto de equações resultantes.
- 3) **Pós-Processamento:** processamentos posteriores e visualização dos resultados obtidos, tais como:
 - Listagem de deslocamentos nodais;
 - Forças e momentos nos elementos;
 - Plotagem de deflexões;
 - Diagrama de faixas de tensão;

4.3.2.2. Resistência dos Materiais

Como discutido anteriormente, foi utilizado um programa de Elementos Finitos na análise estrutural do veículo. Essa análise visa obter a menor massa, sem comprometer a rigidez da estrutura.

Em cada simulação, para as diferentes configurações e materiais testados, os parâmetros (resultados), numericamente calculados, de interesse foram:

a) Linha Elástica:

O programa mostra como resultado o deslocamento de cada um dos nós da malha, que são comparados ao valor estipulado como limite nas premissas do projeto;

b) Tensão de Escoamento:

O programa fornece as tensões em cada elemento, podendo ser comparadas à tensão de escoamento, para verificar se o material entrou ou não no regime plástico;

c) Área, Volume, Massa, Momentos de Inércia:

Calculados para verificação da massa final da estrutura e da estabilidade da mesma.

d) Estabilidade (Flambagem)

Mesmo o elemento não tendo chegado ao limite de escoamento, se o mesmo estiver em compressão ele ainda sim pode perder sua estabilidade, por flambagem. A falha por flambagem é definida como o momento, ou a força aplicada, em que a barra flete de modo que o desvio lateral seja o suficiente para que a linha elástica se torne instável e a viga perca suas capacidades estruturais de resistência a compressão. A flambagem depende da esbeltez da viga

(propriedade geométrica da viga) e do seu carregamento, por isso sua esbeltez, deve ser avaliada, para que não haja a flambagem de nenhum dos elementos, o que pode ocorrer antes do material escoar.

Para o caso de tubos bi-articulados, a menor carga crítica para a flambagem vem da chamada **Fórmula Euler**, que é a tensão máxima suportada pelo tubo antes de ocorrer a flambagem, e pode ser descrita como:

$$\sigma_{FL} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad (4.8)$$

onde: σ_{FL} = tensão de flambagem;

E = módulo de elasticidade do material (módulo de Young);

λ = coeficiente de esbeltez da viga;

O coeficiente de esbeltez da viga vem de:

$$\lambda = \frac{l_{FL}}{i} \quad (4.9)$$

onde: λ = coeficiente de esbeltez da viga;

l_{FL} = comprimento de flambagem da viga (distância entre pontos de curvatura nula);

i = raio de giração = $(I/A)^{1/2}$;

onde:

I = momento de inércia da seção da viga;

A = área da seção transversal da viga;

Para poder comparar com a força resultante do programa de E.F., é necessário calcular o valor da carga crítica advinda dessa tensão da fórmula de Euler. Tem-se:

$$\sigma_{FL} = \frac{P_{CR}}{A} \quad (4.10)$$

onde: σ_{FL} = tensão de flambagem;

P_{CR} = carga crítica de flambagem da viga;

A = área da seção transversal da viga;

Substituindo as equações (4.8) e (4.9) em (4.10), e isolando P_{CR} vem:

$$P_{CR} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_{EF}^2} \quad (4.11)$$

onde: P_{CR} = carga crítica de flambagem da viga;

E = módulo de elasticidade do material (módulo de Young);

I = momento de inércia da seção da viga;

l_{FL} = comprimento de flambagem da viga (distância entre pontos de curvatura nula);

Para o caso da viga bi-articulada (sem restrições fixas quanto a rotação nas duas extremidades) o valor de l_{EF} nada mais é que o comprimento total da viga.

4.3.3. Simulações

4.3.3.1. Dimensões do veículo

O dimensionamento do veículo depende basicamente de três elementos: adequação às restrições e limites impostos pelo regulamento; compatibilidade com os equipamentos selecionados e projetados por Trem de Força e Aerodinâmica; e acomodação e acesso do(a) piloto dentro do veículo.

Todos os limites impostos pelas regras da competição (mencionadas em maior detalhe no capítulo 2) foram respeitados, para evitar qualquer problema com a organização do evento.

O dimensionamento também seguiu os resultados dimensionais obtidos pelos outros elementos do grupo, como por exemplo distância entre eixos e entre rodas, por causa da esterçabilidade do veículo; ou o comprimento do veículo como um todo, para comportar as correias/correntes das reduções e a própria aerodinâmica otimizada do veículo.

Também foi considerado o tamanho médio esperado para o(a) piloto, respeitando a ergonomia e um mínimo de conforto necessário, como descrito no item 4.3.1.

Como resultados finais, tomados como parâmetros nas simulações finais, temos:

- distância entre eixos: 2000 mm;
- largura do veículo na posição do(a) piloto: 700 mm;
- altura, em relação ao assoalho, do veículo na posição do(a) piloto: 800 mm;
- distância ao solo: 100 mm;
- diâmetro do conjunto rodas/pneus: 440 mm;
- distância do eixo dianteiro à ponta do carro: 600 mm (para adequação à bolha aerodinâmica, em relação a encaixe e possíveis batidas de frente);
- existência de arco de proteção acima a cabeça do(a) piloto, comumente chamado de Santo Antônio;

Vale frisar que essas medidas foram sendo aprimoradas durante o trabalho do grupo, e as simulações acompanharam essas variações. Neste trabalho serão mostradas apenas algumas várias simulações executadas, todas para os valores finais acima descritos.

4.3.3.2. Cargas Aplicadas

Nas simulações foram considerados o peso próprio da estrutura, devidamente distribuído nas vigas; a carga obrigatória vertical de 70 kg aplicada de cima para baixo no Santo Antônio; o peso do(a) piloto, superestimado em 600 N, aplicado próximo ao meio do carro; o peso de todas as peças do Trem de Força na parte traseira do carro, 150 N, e dianteira, 30 N. Todas verticais, de cima para baixo.

A massa da cobertura do carro (bolha aerodinâmica), por volta de 5 kg, não foi adicionada nas simulações por não ser considerada de absoluta relevância, e pela indefinição de como seria a distribuição de força pelos pontos de fixação entre bolha e estrutura. Esse fato de certa forma é considerado na definição de fatores de segurança do veículo, discutido no item a seguir.

4.3.3.3. Metodologia Aplicada às Simulações

O modelo utilizado nas simulações foi o de elementos tubulares, de seção circular (anel circular), se comportando no regime elástico, de material isotrópico, em carregamento estático.

Seguindo a estrutura do programa (Ansys 5.3), primeiramente foram definidos os pontos de importância (keypoints) e as linhas da estrutura.

Note que todas as linhas utilizadas foram retas, por seu uso em maior escala, custo inferior e maior disponibilidade no mercado; fica a cargo da equipe que construirá o carro trocá-los ou não por barras curvas, que facilitem sua construção ou acabamento.

Em seguida foram definidos os vínculos da estrutura. Foram aplicadas apenas restrições de translação ao veículo, deixando-o livre no que se refere a rotações. Esses vínculos se aplicaram à roda traseira, tomada como referência, impedida de qualquer movimento translacional (nas três direções) nas duas extremidades onde se fixam as pontas do cubo da roda; e nos dois pontos da estrutura onde serão fixadas as ligações com a caixa de direção das rodas dianteiras, impedidas de movimentarem-se apenas na vertical, para que a estrutura não se torne hiperestática e se aproxime o máximo possível do caso real.

Em seguida define-se as propriedades do material a ser utilizado, como o Módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade. E também sua geometria. Vale ressaltar novamente que os valores utilizados para o diâmetro externo e a espessura de parede dos tubos são para tubos existentes no mercado. Para cada configuração simulada, tanto o aço quanto alumínio foram testados.

Tendo esses dados adicionados ao modelo, o programa faz a solução do problema.

Um resultado de interesse é o deslocamento dos nós da estrutura, mostrando os resultados da linha elástica, para avaliação como descrito no item 4.1.

Outro resultado de interesse é a tensão máxima na viga. O modelo escolhido para essa avaliação foi o de Von Mises, fornecendo a tensão máxima de tração/compressão em cada trecho, partindo da fórmula:

$$\sigma_{bend} = \frac{M.y}{I} \quad (4.12)$$

Essa tensão máxima obtida foi comparada à metade da tensão de escoamento do material. Buscou-se um valor de tensão máxima próxima à metade da tensão de escoamento, e não o valor inteiro como um a espécie de coeficiente de segurança inicial, pensando no quesito estabilidade da estrutura. Apesar de não atingir a tensão de escoamento, vigas em compressão podem ceder por flambagem, com tensões menores

que a de escoamento, perdendo sua função estrutural, e desestabilizando a estrutura como um todo.

Os valores de força nas vigas também são obtidos, para verificação quanto a flambagem nas barras em compressão, como descrito no item 4.3.2.2.

4.3.3.4. Alternativas para teste

O objetivo é obter a configuração de menor massa, preferencialmente a mais simples possível, quanto a concepção e construção.

A partir de um Brainstorming definiu-se algumas configurações que seriam inicialmente simuladas, e o modelo final sairia da evolução desses modelos iniciais.

Partiu-se do conceito mais simples, com apenas o assoalho do carro e o santo Antônio, obrigatório, com seu apoio, simples e grosseiro demais, e foram pensadas outras configurações mais elaboradas, a partir da inicial. Na figura 4.3 as linhas tracejadas são as segundas alternativas para o apoio do Santo Antônio, em cada desenho.

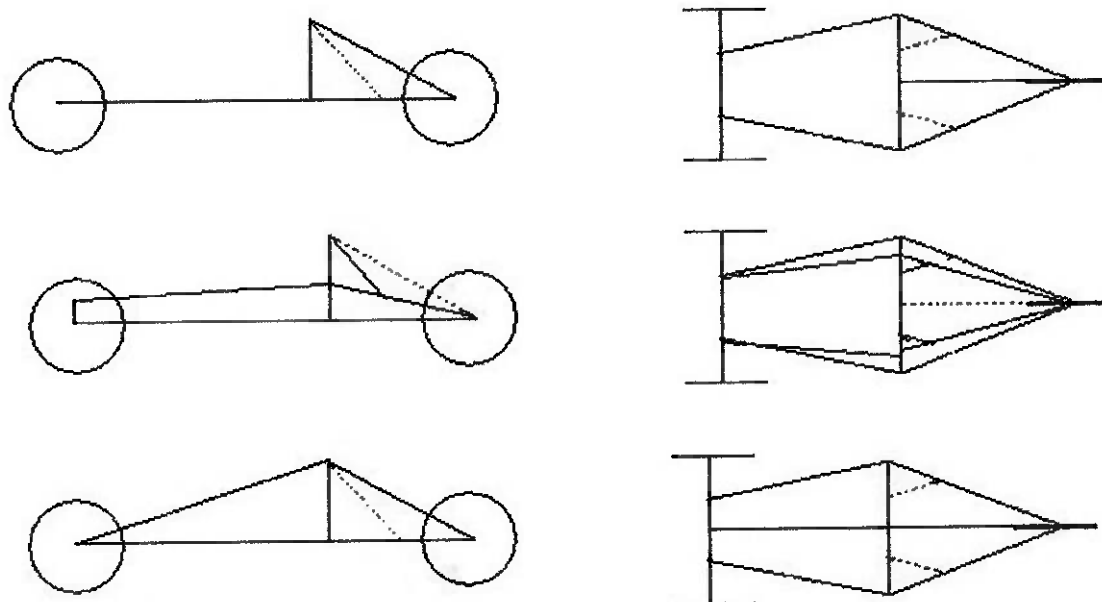


Figura 4.3: Brainstorm de configurações

Foram realizados e analisados testes qualitativos entre cerca de dez configurações diferentes, para comparação entre os modelos, e se formar uma idéia da variação da rigidez com o aumento do número de barras, e conseqüentemente a massa, ou a mudança no posicionamento de algumas delas, e também desenvolver um pouco de "intuição" perante os modelos.

Os modelos foram todos elaborados com o mesmo elemento de barra, nas mesmas configurações, onde cada um era uma pequena variação do anterior.

A partir dessas simulações iniciais, após a implementação de seguidas melhorias, chegou-se a um modelo considerado muito próximo da configuração final. Abaixo uma tabela com a posição, em mm, de seus "keypoints", fornecida pelo ANSYS, e o número de nó que lhe foi atribuído:

Tabela 4. 3 LIST ALL SELECTED KEYPOINTS.

NO.	X	Y	Z	NODE
1	.000	220.	100.	1
2	.000	220.	-100.	2
3	.100E+04	850.	.000	7
4	.100E+04	100.	350.	16
5	.100E+04	100.	-350.	21
6	.100E+04	350.	350.	26
7	.100E+04	350.	-350.	31
8	.200E+04	100.	200.	48
9	.200E+04	100.	-200.	63
10	.200E+04	300.	200.	53
11	.200E+04	300.	-200.	58
12	.260E+04	100.	200.	84
13	.260E+04	100.	-200.	89

E uma tabela com suas barras e respectivos “keypoints” de origem, seus comprimentos e sendo dividida em quatro elementos cada para análise:

Tabela 4. 4 LIST ALL SELECTED LINES.

NO.	KEYPOINTS	LENGTH
1	1 2	200.
2	2 3	.119E+04
3	3 1	.119E+04
4	1 4	.104E+04
5	2 5	.104E+04
6	6 4	250.
7	7 5	250.
8	7 3	610.
9	3 6	610.
10	4 5	700.
11	4 8	.101E+04
12	8 10	200.
13	10 11	400.
14	11 9	200.
15	9 8	400.
16	10 6	.101E+04
17	7 11	.101E+04
18	9 5	.101E+04
19	8 12	600.
20	12 13	400.
21	13 9	600.

Executando a simulação para diferentes tubos e materiais:

Tabela 4.5 Resultados da simulação

Material	Diâmetro Externo (pol)	Espessura de Parede (mm)	Deslocamento Máximo (mm)	Massa (kg)	Carga Crítica de Flambagem (N)	Tensão Máxima (MPa)
Aço 4340	1	1,5	15,5	12,5	1100	271
Aço 4340	1	1,2	18,53	9,97	970	324
Alumínio	1,5	1,6	12,1	6,7	1380	104
Alumínio	1	1,6	42,4	4,5	1000	251

Nota-se que para esta configuração o tubo de alumínio 1 pol x 1,6 mm é a melhor escolha, uma vez que necessita de uma força de 1380 N para flambar, e em a menor massa, já que no tubo de 1 pol a tensão máxima ultrapassa a de escoamento (250 Mpa), e seu deslocamento nodal é muito alto.

Nota-se ainda, nas figuras seguintes, a má distribuição de tensões na estrutura; apenas na base do Santo Antônio a tensão é alta, ou seja, o material está sendo subaproveitado nas outras partes da estrutura.

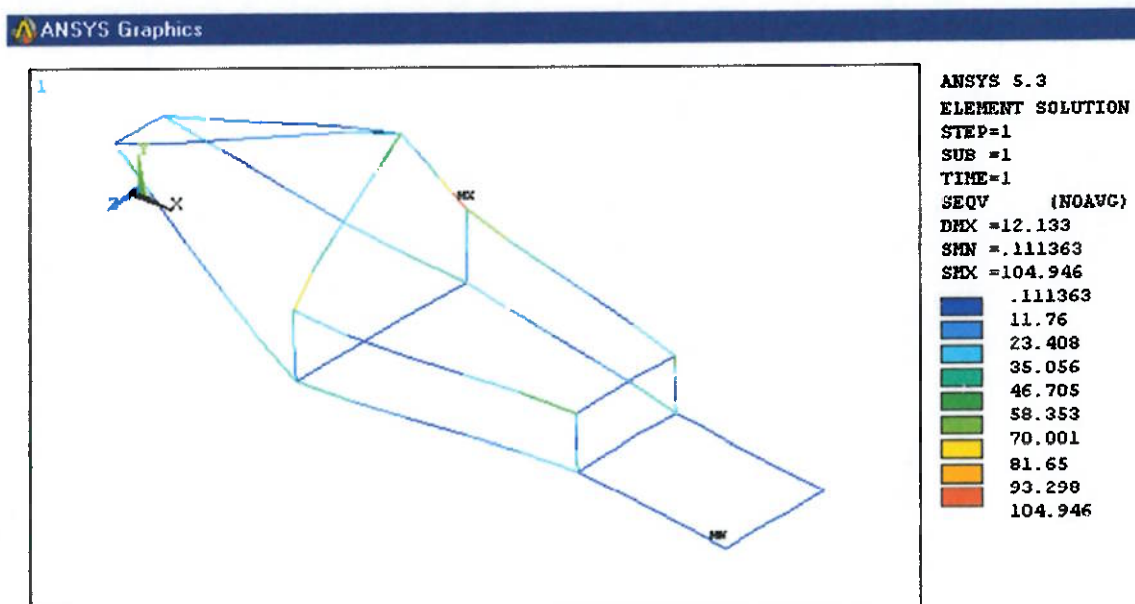


Fig. 4.4 Figura de tensão nos elementos de viga

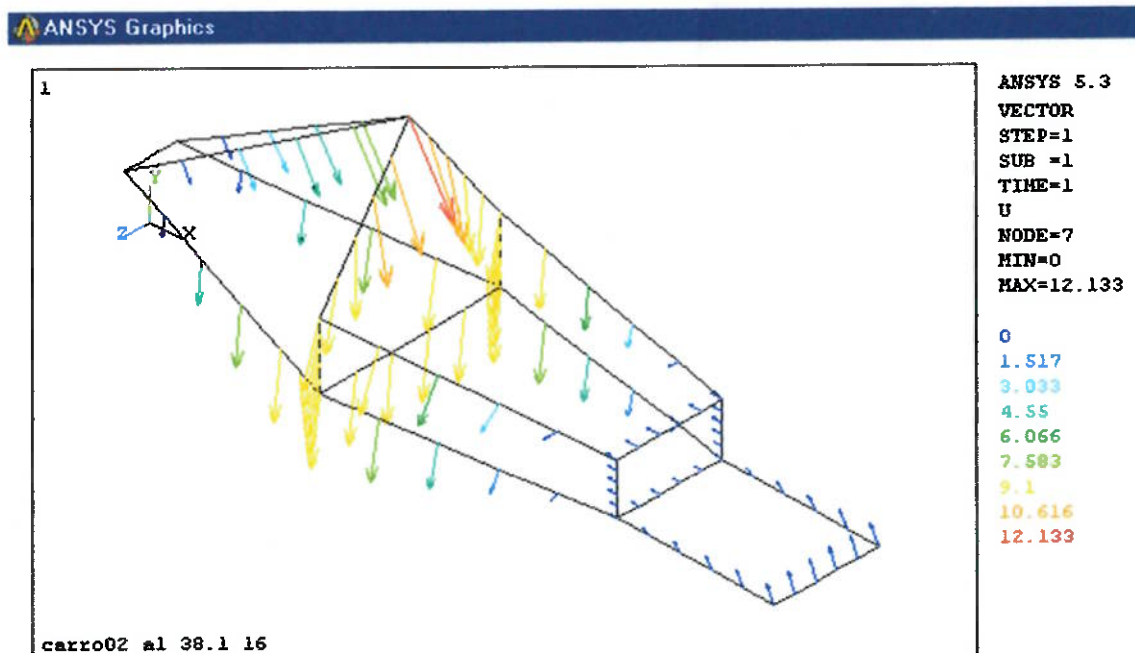


Fig. 4.5 Figura de vetores de deslocamentos nos elementos de viga

Essa concentração sugere uma mudança na estrutura, de modo a distribuir melhor essas tensões, e aproveitar mais conscientemente o material das vigas.

A mudança feita foi deslocar o “keypoint” 03 na direção da parte de trás do veículo(X), cerca de 200 mm, sendo sua nova posição no espaço (X, Y, Z) = (800, 850, 0), mantendo-se mesmo material e os mesmos dimensionais (diâmetro externo e espessura de parede das vigas):

Tabela 4. 6 LIST ALL SELECTED KEYPOINTS.

NO.	X	Y	Z	NODE
1	.000	220.	100.	1
2	.000	220.	-100.	2
3	800.	850.	.000	7
4	.100E+04	100.	350.	16
5	.100E+04	100.	-350.	21
6	.100E+04	350.	350.	26
7	.100E+04	350.	-350.	31
8	.200E+04	100.	200.	48
9	.200E+04	100.	-200.	63
10	.200E+04	300.	200.	53
11	.200E+04	300.	-200.	58
12	.260E+04	100.	200.	84
13	.260E+04	100.	-200.	89

Como novas barras, seus respectivos comprimentos e “keypoints”, têm-se

Tabela 4.7 LIST ALL SELECTED LINES.

NO.	KEYPOINTS	LENGTH
1	1 2	200.
2	1 3	.102E+04
3	3 6	642.
4	1 4	.104E+04
5	2 5	.104E+04
6	6 4	250.
7	7 5	250.
8	3 7	642.
9	3 2	.102E+04
10	4 5	700.
11	4 8	.101E+04
12	8 10	200.
13	10 11	400.
14	11 9	200.
15	9 8	400.
16	10 6	.101E+04
17	7 11	.101E+04
18	9 5	.101E+04
19	8 12	600.
20	12 13	400.
21	13 9	600.

Nota-se agora uma melhor distribuição das tensões nas vigas, porém com certo aumento do deslocamento nodal máximo (19,2 mm) e da tensão máxima na viga (133,7 MPa), No entanto são valores ainda aceitáveis, uma vez que manteve aproximadamente a mesma massa e, de acordo com as premissas o projeto, uma vez que a tensão máxima na viga é cerca de 53% da tensão de escoamento do alumínio, e o deslocamento, além de estar próximo ao desejado, não se encontra em regiões de importante interferência com a bolha aerodinâmica ou com os elementos de trem de força, como está mostrado nas figuras abaixo:

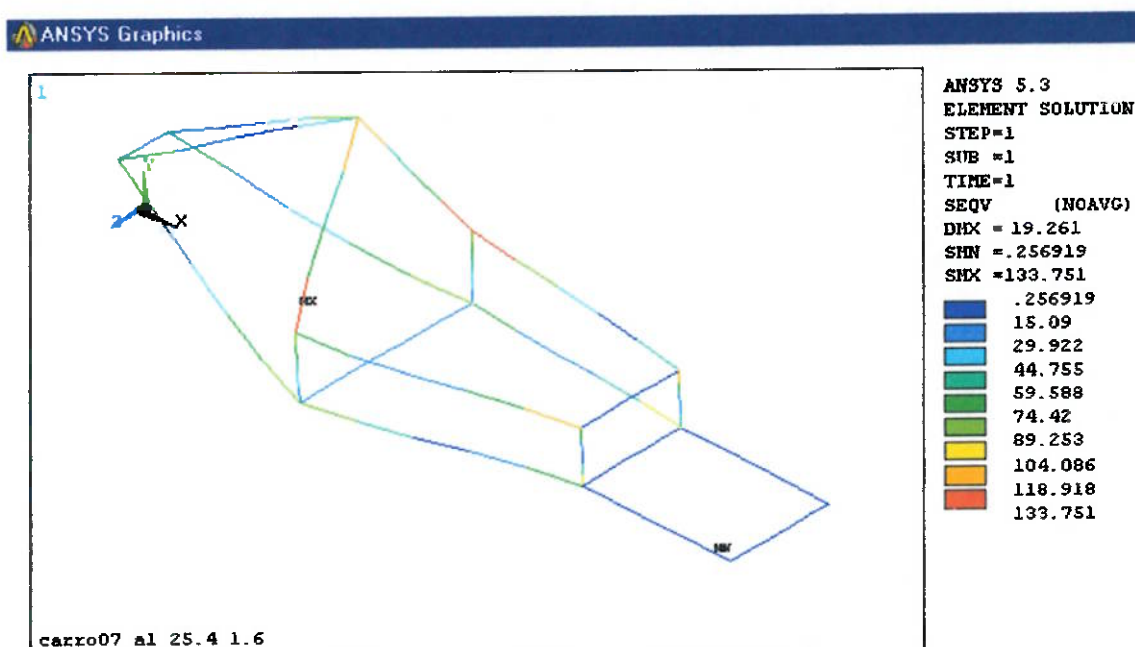


Fig. 4.6 Figura de tensões nos elementos de viga

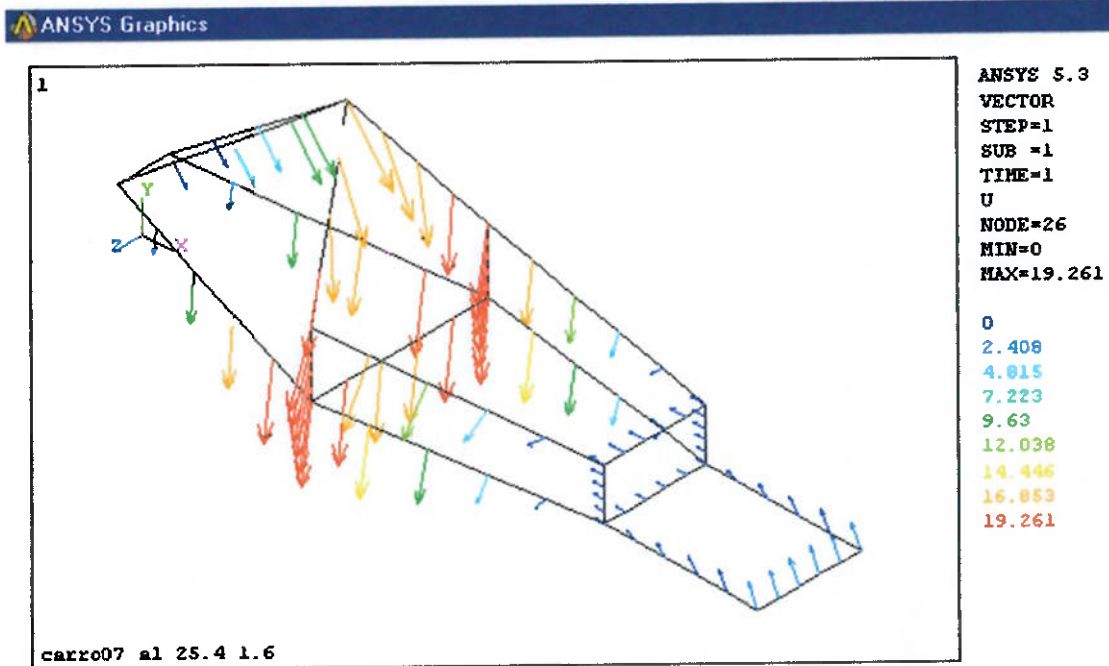


Fig. 4.7 Figura de vetores de deslocamentos nos elementos de viga (isométrica)

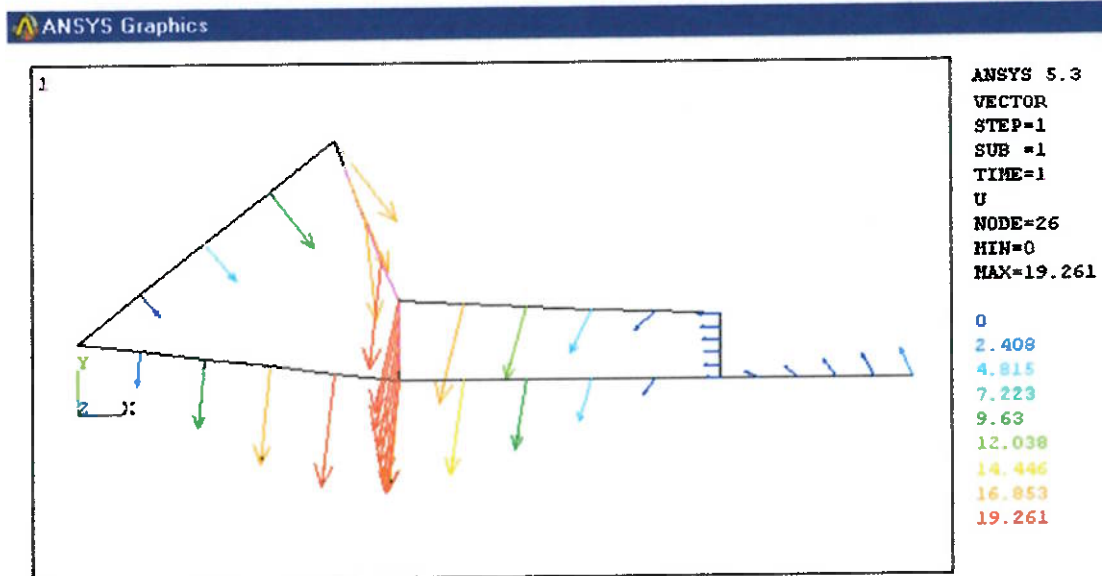


Fig. 4.8 Figura de vetores de deslocamentos nos elementos de viga (lateral)

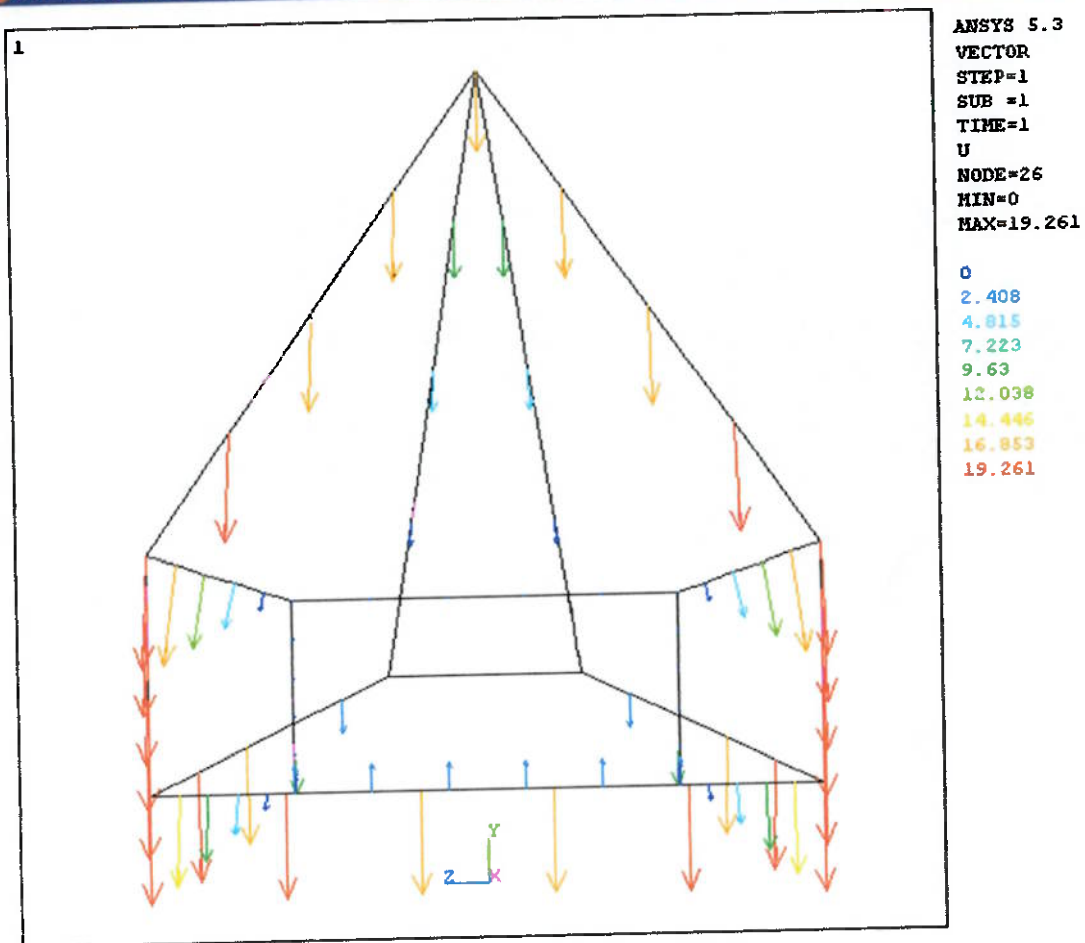


Fig. 4.9 Figura de vetores de deslocamentos nos elementos de viga (frontal)

Abaixo algumas tabelas resumindo as propriedades e resultados da simulação final:

Tabela 4.8 Resultados da simulação

Material	Diâmetro Externo (pol)	Espessura de Parede (mm)	Deslocamento Máximo (mm)	Massa (kg)	Carga Crítica de Flambagem (N)	Tensão Máxima (MPa)
Alumínio	1	1,6	19,2	4,5	1000	134

Tabela 4.9 Resultados da simulação

Tensão de Escoamento (MPa)	E (Gpa)	Densidade (kg/m ³)	I (m ⁴)
250	70	2690	8,51E-09

Tabela 4.10 Posição dos nós no espaço (em mm)

NODE	X	Y	Z
1	.0000000000	220.00000000	100.00000000
2	.0000000000	220.00000000	-100.00000000
3	.0000000000	220.00000000	60.00000000
4	.0000000000	220.00000000	20.00000000
5	.0000000000	220.00000000	-20.00000000
6	.0000000000	220.00000000	-60.00000000
16	1000.00000000	100.00000000	350.00000000
17	200.00000000	196.00000000	150.00000000
18	400.00000000	172.00000000	200.00000000
19	600.00000000	148.00000000	250.00000000
20	800.00000000	124.00000000	300.00000000
21	1000.00000000	100.00000000	-350.00000000
22	200.00000000	196.00000000	-150.00000000
23	400.00000000	172.00000000	-200.00000000
24	600.00000000	148.00000000	-250.00000000
25	800.00000000	124.00000000	-300.00000000
26	1000.00000000	350.00000000	350.00000000
27	1000.00000000	300.00000000	350.00000000
28	1000.00000000	250.00000000	350.00000000
29	1000.00000000	200.00000000	350.00000000
30	1000.00000000	150.00000000	350.00000000
31	1000.00000000	350.00000000	-350.00000000
32	1000.00000000	300.00000000	-350.00000000
33	1000.00000000	250.00000000	-350.00000000
34	1000.00000000	200.00000000	-350.00000000
35	1000.00000000	150.00000000	-350.00000000
44	1000.00000000	100.00000000	210.00000000
45	1000.00000000	100.00000000	70.00000000
46	1000.00000000	100.00000000	-70.00000000
47	1000.00000000	100.00000000	-210.00000000
48	2000.00000000	100.00000000	200.00000000
49	1200.00000000	100.00000000	320.00000000
50	1400.00000000	100.00000000	290.00000000
51	1600.00000000	100.00000000	260.00000000
52	1800.00000000	100.00000000	230.00000000
53	2000.00000000	300.00000000	200.00000000
54	2000.00000000	140.00000000	200.00000000
55	2000.00000000	180.00000000	200.00000000
56	2000.00000000	220.00000000	200.00000000
57	2000.00000000	260.00000000	200.00000000
58	2000.00000000	300.00000000	-200.00000000
59	2000.00000000	300.00000000	120.00000000
60	2000.00000000	300.00000000	40.00000000
61	2000.00000000	300.00000000	-40.00000000
62	2000.00000000	300.00000000	-120.00000000
63	2000.00000000	100.00000000	-200.00000000
64	2000.00000000	260.00000000	-200.00000000
65	2000.00000000	220.00000000	-200.00000000
66	2000.00000000	180.00000000	-200.00000000
67	2000.00000000	140.00000000	-200.00000000
68	2000.00000000	100.00000000	-120.00000000
69	2000.00000000	100.00000000	-40.00000000
70	2000.00000000	100.00000000	40.00000000
71	2000.00000000	100.00000000	120.00000000

NODE	X	Y	Z
72	1800.00000000	310.00000000	230.00000000
73	1600.00000000	320.00000000	260.00000000
74	1400.00000000	330.00000000	290.00000000
75	1200.00000000	340.00000000	320.00000000
76	1200.00000000	340.00000000	-320.00000000
77	1400.00000000	330.00000000	-290.00000000
78	1600.00000000	320.00000000	-260.00000000
79	1800.00000000	310.00000000	-230.00000000
80	1800.00000000	100.00000000	-230.00000000
81	1600.00000000	100.00000000	-260.00000000
82	1400.00000000	100.00000000	-290.00000000
83	1200.00000000	100.00000000	-320.00000000
84	2600.00000000	100.00000000	200.00000000
85	2120.00000000	100.00000000	200.00000000
86	2240.00000000	100.00000000	200.00000000
87	2360.00000000	100.00000000	200.00000000
88	2480.00000000	100.00000000	200.00000000
89	2600.00000000	100.00000000	-200.00000000
90	2600.00000000	100.00000000	120.00000000
91	2600.00000000	100.00000000	40.00000000
92	2600.00000000	100.00000000	-40.00000000
93	2600.00000000	100.00000000	-120.00000000
94	2480.00000000	100.00000000	-200.00000000
95	2360.00000000	100.00000000	-200.00000000
96	2240.00000000	100.00000000	-200.00000000
97	2120.00000000	100.00000000	-200.00000000
99	200.00000000	377.50000000	75.00000000
100	400.00000000	535.00000000	50.00000000
101	600.00000000	692.50000000	25.00000000
102	850.00000000	725.00000000	87.50000000
103	900.00000000	600.00000000	175.00000000
104	950.00000000	475.00000000	262.50000000
105	850.00000000	725.00000000	-87.50000000
106	900.00000000	600.00000000	-175.00000000
107	950.00000000	475.00000000	-262.50000000
108	600.00000000	692.50000000	-25.00000000
109	400.00000000	535.00000000	-50.00000000
110	200.00000000	377.50000000	-75.00000000

Tabela 4.11 Deslocamentos dos nós no espaço (em mm)

NODE	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
1	.00000	.00000	.00000	.19416E-02	.42993E-03	-.23998E-01
2	.00000	.00000	.00000	-.19416E-02	-.42993E-03	-.23998E-01
3	-.13758E-01	.62116E-01	.00000	.11646E-02	.25796E-03	-.23998E-01
4	-.20637E-01	.93167E-01	.00000	.38815E-03	.85987E-04	-.23998E-01
5	-.20637E-01	.93167E-01	.00000	-.38815E-03	-.85987E-04	-.23998E-01
6	-.13758E-01	.62116E-01	.00000	-.11646E-02	-.25796E-03	-.23998E-01
16	-2.2263	-18.783	-.54867E-02	.43466E-02	-.24779E-02	.86606E-02
17	-.63300	-5.6460	-.15648	.53468E-02	.19426E-03	-.28997E-01
18	-1.3021	-11.577	-.30502	.66512E-02	-.21437E-03	-.25676E-01
19	-1.8383	-16.214	-.36609	.65633E-02	-.79594E-03	-.16868E-01
20	-2.1645	-18.803	-.28320	.57913E-02	-.15505E-02	-.54078E-02
21	-2.2263	-18.783	.54867E-02	-.43466E-02	.24779E-02	.86606E-02
22	-.63300	-5.6460	.15648	-.53468E-02	-.19426E-03	-.28997E-01
23	-1.3021	-11.577	.30502	-.66512E-02	.21437E-03	-.25676E-01
24	-1.8383	-16.214	.36609	-.65633E-02	.79594E-03	-.16868E-01
25	-2.1645	-18.803	.28320	-.57913E-02	.15505E-02	-.54078E-02
26	-4.1548	-18.777	1.0602	.46497E-02	-.92411E-02	.34274E-02
27	-3.9111	-18.779	.83570	.43785E-02	-.78885E-02	.59672E-02
28	-3.5591	-18.780	.62217	.42125E-02	-.65358E-02	.77604E-02
29	-3.1361	-18.781	.41431	.41519E-02	-.51832E-02	.88070E-02
30	-2.6794	-18.782	.20685	.41966E-02	-.38306E-02	.91071E-02
31	-4.1548	-18.777	-1.0602	-.46497E-02	.92411E-02	.34274E-02
32	-3.9111	-18.779	-.83570	-.43785E-02	.78885E-02	.59672E-02
33	-3.5591	-18.780	-.62217	-.42125E-02	.65358E-02	.77604E-02
34	-3.1361	-18.781	-.41431	-.41519E-02	.51832E-02	.88070E-02
35	-2.6794	-18.782	-.20685	-.41966E-02	.38306E-02	.91071E-02
44	-1.9488	-18.297	-.32920E-02	.25934E-02	-.14868E-02	.86606E-02
45	-1.8100	-18.056	-.10973E-02	.86206E-03	-.49559E-03	.86606E-02
46	-1.8100	-18.056	.10973E-02	-.86206E-03	.49559E-03	.86606E-02
47	-1.9488	-18.297	.32920E-02	-.25934E-02	.14868E-02	.86606E-02
48	-2.1800	.00000	.11303E-03	.23241E-03	.67131E-03	.80975E-02
49	-2.1665	-15.899	.33273	.49277E-02	-.99652E-03	.17908E-01
50	-2.1447	-11.622	.41724	.48133E-02	.59110E-04	.22518E-01
51	-2.1483	-6.9043	.33320	.39970E-02	.68896E-03	.22449E-01
52	-2.1643	-2.7067	.16578	.24722E-02	.89303E-03	.17656E-01
53	-3.4204	-.25005E-02	.89521E-03	.54101E-03	.20265E-02	.88894E-02
54	-2.4549	-.50131E-03	.19222E-02	-.35389E-04	.94235E-03	.62833E-02
55	-2.6769	-.10020E-02	-.36853E-02	-.13843E-03	.12134E-02	.54553E-02
56	-2.8855	-.15021E-02	-.10119E-01	-.76708E-04	.14844E-02	.56137E-02
57	-3.1202	-.20016E-02	-.10789E-01	.14977E-03	.17555E-02	.67584E-02
58	-3.4204	-.25005E-02	-.89521E-03	-.54101E-03	-.20265E-02	.88894E-02
59	-3.5501	.31953E-01	.53713E-03	.32189E-03	.12159E-02	.88894E-02
60	-3.6150	.49072E-01	.17904E-03	.10685E-03	.40530E-03	.88894E-02
61	-3.6150	.49072E-01	-.17904E-03	-.10685E-03	-.40530E-03	.88894E-02
62	-3.5501	.31953E-01	-.53713E-03	-.32189E-03	-.12159E-02	.88894E-02
63	-2.1800	.00000	-.11303E-03	-.23241E-03	-.67131E-03	.80975E-02
64	-3.1202	-.20016E-02	.10789E-01	-.14977E-03	-.17555E-02	.67584E-02
65	-2.8855	-.15021E-02	.10119E-01	.76708E-04	-.14844E-02	.56137E-02
66	-2.6769	-.10020E-02	.36853E-02	.13843E-03	-.12134E-02	.54553E-02
67	-2.4549	-.50131E-03	-.19222E-02	.35389E-04	-.94235E-03	.62833E-02
68	-2.2230	.10463E-01	-.67819E-04	-.61517E-04	-.40279E-03	.80975E-02
69	-2.2445	.11746E-01	-.22606E-04	-.21452E-05	-.13426E-03	.80975E-02
70	-2.2445	.11746E-01	.22606E-04	.21452E-05	.13426E-03	.80975E-02
71	-2.2230	.10463E-01	.67819E-04	.61517E-04	.40279E-03	.80975E-02

72	-3.4609	-2.9829	.66355	.32909E-02	.40191E-02	.19236E-01
73	-3.5482	-7.5234	1.5350	.50701E-02	.38886E-02	.23819E-01
74	-3.6883	-12.447	2.1811	.58854E-02	.16351E-02	.22683E-01

NODE	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
75	-3.8882	-16.585	2.1675	.57431E-02	-.27415E-02	.15872E-01
76	-3.8882	-16.585	-2.1675	-.57431E-02	.27415E-02	.15872E-01
77	-3.6883	-12.447	-2.1811	-.58854E-02	-.16351E-02	.22683E-01
78	-3.5482	-7.5234	-1.5350	-.50701E-02	-.38886E-02	.23819E-01
79	-3.4609	-2.9829	-.66355	-.32909E-02	-.40191E-02	.19236E-01
80	-2.1643	-2.7067	-.16578	-.24722E-02	-.89303E-03	.17656E-01
81	-2.1483	-6.9043	-.33320	-.39970E-02	-.68896E-03	.22449E-01
82	-2.1447	-11.622	-.41724	-.48133E-02	-.59110E-04	.22518E-01
83	-2.1665	-15.899	-.33273	-.49277E-02	.99652E-03	.17908E-01
84	-2.1800	4.6958	-.11276E-03	.34697E-04	-.18887E-03	.77162E-02
85	-2.1800	.96125	-.54918E-01	.19286E-03	.27099E-03	.79358E-02
86	-2.1800	1.9063	-.68759E-01	.15332E-03	-.15193E-04	.78260E-02
87	-2.1800	2.8409	-.55107E-01	.11378E-03	-.18723E-03	.77589E-02
88	-2.1800	3.7696	-.27659E-01	.74239E-04	-.24512E-03	.77254E-02
89	-2.1800	4.6958	.11276E-03	-.34697E-04	.18887E-03	.77162E-02
90	-2.1679	4.6979	-.67654E-04	.18107E-04	-.11332E-03	.77162E-02
91	-2.1619	4.6988	-.22551E-04	.55840E-05	-.37774E-04	.77162E-02
92	-2.1619	4.6988	.22551E-04	-.55840E-05	.37774E-04	.77162E-02
93	-2.1679	4.6979	.67654E-04	-.18107E-04	.11332E-03	.77162E-02
94	-2.1800	3.7696	.27659E-01	-.74239E-04	.24512E-03	.77254E-02
95	-2.1800	2.8409	.55107E-01	-.11378E-03	.18723E-03	.77589E-02
96	-2.1800	1.9063	.68759E-01	-.15332E-03	.15193E-04	.78260E-02
97	-2.1800	.96125	.54918E-01	-.19286E-03	-.27099E-03	.79358E-02
98	10.669	-13.587	-.45221E-12	.13558E-13	.77797E-14	-.26650E-01
99	3.0003	-3.8002	.12317	.18590E-02	.12619E-02	-.15521E-01
100	5.1278	-6.5138	.10899	.15136E-02	.14675E-02	-.13091E-01
101	7.3559	-9.3638	.40655E-01	.89684E-03	.10469E-02	-.16777E-01
102	6.5425	-15.107	.18885	.13564E-02	-.99974E-02	-.30223E-01
103	1.7811	-16.732	.58863	.25755E-02	-.14870E-01	-.26397E-01
104	-2.2421	-18.082	.95950	.36693E-02	-.14618E-01	-.15178E-01
105	6.5425	-15.107	-.18885	-.13564E-02	.99974E-02	-.30223E-01
106	1.7811	-16.732	-.58863	-.25755E-02	.14870E-01	-.26397E-01
107	-2.2421	-18.082	-.95950	-.36693E-02	.14618E-01	-.15178E-01
108	7.3559	-9.3638	-.40655E-01	-.89684E-03	-.10469E-02	-.16777E-01
109	5.1278	-6.5138	-.10899	-.15136E-02	-.14675E-02	-.13091E-01
110	3.0003	-3.8002	-.12317	-.18590E-02	-.12619E-02	-.15521E-01

MAXIMUM ABSOLUTE VALUES

NODE	98	20	77	18	106	102
VALUE	10.669	-18.803	-2.1811	.66512E-02	.14870E-01	-.30223E-01

Vale ressaltar neste ponto que a movimentação do ponto “03” ainda mais para trás tende a melhorar mais, até certo ponto, a distribuição de tensões na estrutura, porém o Santo Antônio começaria a se afastar demasiadamente da cabeça do(a) piloto, aumentando o risco para o mesmo em caso de acidente.

5. CONSIDERAÇÕES SOBRE FABRICAÇÃO E MONTAGEM

A estrutura foi idealizada para ser como uma “gaiola”, para ser construída com barras (vigas) soldadas umas às outras. É recomendado cuidado especial com o procedimento de soldagem. Deve ser realizado o dimensionamento do cordão, levando em conta concentração de tensões, alteração de propriedades do material durante o processo de aquecimento/resfriamento, a espessura reduzida do tubo e a não trivialidade que envolve soldar um material como o alumínio.

Outra recomendação é evitar a soldar muitos tubos em um mesmo ponto, pois ocasionaria a fragilidade do material, podendo comprometer a integridade da estrutura.

Quanto ao tipo de viga do modelo, apenas vigas retas foram utilizadas. Fica a critério da equipe a substituição de algumas das barras retas por barras curvas, devidamente analisadas, que poderia reduzir o número de cordões de solda e facilitar a construção do veículo.

O chassi do veículo foi dimensionado para resistir estruturalmente aos carregamentos e forças atuantes apenas, de maneira mais geral, não houve preocupação específica em adicionar barras ou chapas para fazer a fixação dos elementos de trem de força ou carroceria. Houve sim a preocupação com a compatibilidade, principalmente espacial, entre estes elementos e o chassi, ficando a cargo da equipe que virá a construir o veículo a definição de quais barras ou chapas devem ser adicionadas para a montagem final do veículo.

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

A idéia do grupo ao iniciar este trabalho era a construção ao menos de um protótipo até a conclusão dos trabalhos. Isso não foi possível principalmente pela dificuldade em conseguir patrocínios e em conciliar o desenvolvimento do trabalho com estágios e compromissos. O grupo torce para que o trabalho seja levado a diante, que uma equipe de politécnicos seja formada para realizar o sonho de participar da competição para qual o carro foi projetado. Ainda existe trabalho a fazer.

A massa final obtida para o veículo acabou por surpreender o grupo, que não esperava valor tão baixo. Porém quando comparado a outros veículos que participam deste tipo de competição, esse resultado torna-se mais aceitável. O carro ficou com massa total entre 20 e 25 kg, e, quando comparado aos 35 kg de média divulgado pelas equipes européias, parece pouco; porém, a maioria absoluta dos carros da competição francesa trabalha com motores desenvolvidos para aplicações como essa, trabalham com injeção de combustível e controles automatizados, tendo também que carregar uma bateria para isso. Esses elementos com certeza acarretam em uma maior massa total do carro, justificando o valor relativamente baixo encontrado pela equipe neste trabalho, que não utiliza, em projeto, qualquer elemento eletrônico ou automatizado, ficando a cargo da futura equipe providenciar, achando viável e/ou necessário. Com esses equipamentos as equipes otimizam o desempenho de seus veículos, de maneira a compensar o acréscimo em peso, e conseguindo o desempenho quase vinte vezes maior do que o obtido na prova brasileira este ano.

Quanto a critérios ou coeficientes de segurança, o único utilizado durante o projeto da estrutura foi a tensão máxima não ultrapassar um valor por volta de 50% da tensão de escoamento do material. Por um lado, por ser um veículo projetado para uma utilização específica, no caso a competição, têm-se uma boa idéia sobre as condições externas que o veículo pode enfrentar, sem grandes variações. Por isso pode-se pensar em utilizar as propriedades do material praticamente ao máximo, sem grandes coeficientes de segurança envolvidos.

Por outro lado, as condições extra-pista são um pouco mais imprevisíveis. Situações como o traslado do veículo entre a escola e o local da competição, o veículo precisará ser levantado, carregado, depositado novamente no chão, podendo sofrer impactos não previstos em projeto. Mesmo dentro do caminhão, ou meio de transporte utilizado, isso pode acontecer, dada a situação das estradas brasileiras, do trânsito e a índole de alguns motoristas.

Outra situação mais comum é a entrada e saída do(a)piloto no veículo, que deve acontecer diversas vezes. O impacto causado por uma pessoa que deve possuir por volta de duas a três vezes a massa do carro pode causar danos ao veículo, dada sua repetibilidade, e deve ser pesada também.

E a utilização de um coeficiente de segurança, mesmo que dobrando a massa da estrutura, em números absolutos significaria um acréscimo de 5 kg. Deve-se pesar bem a influência desse acréscimo de massa no consumo do veículo, contra o risco de enfrentar situações fora da normalidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FRANÇA Shell France. **Shell Eco Marathon**. França: 2004. Disponível em: <http://www.shell.com/home/Framework?siteId=fr-fr&FC2=/fr-fr/html/iwgen/society_environment/eco_marathon/infos_presse/zzz_lhn.html&FC3=/fr-fr/html/iwgen/society_environment/eco_marathon/infos_presse/shell_eco_infos_presse_edition_2004_anglais_080204_1200.html>. Acesso em 15 abr. 2004.
- FRANÇA Site Officiel de la PV3e – News. **Concurrents** França: 2004. Disponível em : <<http://perso.club-internet.fr/lepaludf/pv3e/concurrents.html>>. Acesso em 10 out. 2004
- KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000. 132p.
- ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Oxford: Pergamon Press, 1992. 311p.
- BUDINSKI, K. G.; BUDINSKI, M. K. **Engineering Materials: Properties and Selection**. 6.ed. Columbs, 1999. 719p.
- CHIAVESINI, V.; **Tecnologia Mecânica – Materiais de Construção Mecânica**. McGraw Hill, p. 125. v. 3
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E.; **Mecânica dos Sólidos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1994. 450p. v.1 e v.2
- SALVAGNI, R. B.; **Apostila decurso PME 5002: Análise Estrutural em Engenharia Mecânica**. São Paulo: Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia Mecânica, 2003. 64p.