

AUGUSTO BORELLA HOUGAZ

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE VEÍCULO MINI-BAJA,
VISANDO SIMULAÇÃO DINÂMICA DE TENSÕES**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do Diploma de Graduação.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Alberto Nunes Dias

São Paulo

2001

"Tudo que sei é que nada sei"
Sócrates

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Carlos Alberto Nunes Dias pelas suas paciência, didática e dedicação, que contribuíram significativamente tanto para a minha formação profissional quanto para a consecução deste trabalho.

A todos os meus familiares e amigos que, direta ou indiretamente, auxiliaram, das mais diversas formas, na minha longa jornada como estudante.

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Símbolos

Resumo

“Abstract”

“Résumé”

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MODELAGEM.....	3
2.1. A ESTRUTURA.....	3
2.2. USO DA SUSPENSÃO E RODAS	4
2.3. ELEMENTOS E MATERIAIS.....	6
2.3.1. <i>Estrutura</i>	6
2.3.2. <i>Corpos</i>	11
2.3.3. <i>Suspensões</i>	14
2.3.4. <i>Rodas/Pneus</i>	19
2.3.5. <i>Considerações sobre a Modelagem</i>	22
3. ANÁLISES ESTÁTICAS.....	24
3.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO.....	24
3.1.1. <i>Primeiro Caso</i>	25
3.1.2. <i>Segundo Caso</i>	26
3.1.3. <i>Terceiro Caso</i>	26

3.1.4. <i>Considerações sobre os Casos de Análise Estática</i>	26
3.2. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	27
4. ANÁLISE DINÂMICA	31
4.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO E PERFIL DE TESTE	32
4.2. EFEITO DA GRAVIDADE	35
4.3. CALIBRAÇÃO DO TIME STEP	37
4.4. RESULTADOS E ANÁLISE	37
4.5. MODELO CONSIDERADO IDEAL	42
5. CONCLUSÃO	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

Apêndice A

Apêndice B (CD-Rom)

Lista de Figuras

FIGURA 1: VISTA LATERAL DO VEÍCULO MINI-BAJA (MEDIDAS EM CM).....	3
FIGURA 2: VISTA DA BASE DA ESTRUTURA (MEDIDAS EM CM)	4
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO DOS TUBOS DA ESTRUTURA.....	9
FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DAS BARRAS DA ESTRUTURA.....	10
FIGURA 5: CONJUNTO DE TUBOS E BARRAS DE AÇO FORMANDO A ESTRUTURA	10
FIGURA 6: REPRESENTAÇÃO DO CORPO DO PILOTO.	12
FIGURA 7: REPRESENTAÇÃO DO CORPO DO MOTOR.....	13
FIGURA 8: REPRESENTAÇÃO DO CORPO DO CVT.....	13
FIGURA 9: MODELO DO CONJUNTO COMPLETO DA SUSPENSÃO DIANTEIRA.....	17
FIGURA 10: MODELO DO CONJUNTO COMPLETO DA SUSPENSÃO TRASEIRA	19
FIGURA 11: DIMENSÕES PRINCIPAIS DE PNEU E RODA IDEALIZADOS (EM MM).....	20
FIGURA 12: ILUSTRAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DO CONJUNTO RODA PNEU	21
FIGURA 13: MODELO COMPLETO DO MINI-BAJA.....	23
FIGURA 14: CONDIÇÕES DE CONTORNO NO PLANO XY.....	25
FIGURA 15: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA ESTRUTURA SOB O CARREGAMENTO DO CASO 1	27
FIGURA 16: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA ESTRUTURA SOB O CARREGAMENTO DO CASO 2	28
FIGURA 17: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA ESTRUTURA SOB O CARREGAMENTO DO CASO 3	29
FIGURA 18: PERFIL DE PISTA SIMULADO.....	33

FIGURA 19: DESLOCAMENTO VERTICAL IMPOSTO ÀS RODAS ESQUERDAS	34
FIGURA 20: DESLOCAMENTO VERTICAL IMPOSTO ÀS RODAS DIREITAS	35
FIGURA 21: ESTABILIZAÇÃO DA ESTRUTURA NA ANÁLISE DINÂMICA APÓS A APLICAÇÃO DA GRAVIDADE	36
FIGURA 22: PONTOS DE REFERÊNCIA NA ESTRUTURA	36
FIGURA 23: DESLOCAMENTO VERTICAL DOS PNEUS E DOS PONTOS DE REFERÊNCIA.	38
FIGURA 24: ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA SOB EFEITO APENAS DA GRAVIDADE (PA).....	39
FIGURA 25: ANÁLISE NÃO LINEAR ESTÁTICA SOB EFEITO APENAS DA GRAVIDADE (PA)...	40
FIGURA 26: ANÁLISE NÃO LINEAR DINÂMICA SOB EFEITO APENAS DA GRAVIDADE (PA)...	40

Lista de Símbolos

A	área
CVT	sistema automático de transmissão por correia
D	diâmetro de um cilindro
D _{ext}	diâmetro externo de um tubo
E	módulo de elasticidade
esp	espessura de um tubo
G	aceleração da gravidade
I	momento de inércia
J	momento de inércia polar
k	constante elástica de uma mola
L	comprimento do lado de um quadrado ou comprimento de uma treliça
m	massa
V	volume
X, Y, Z	coordenadas cartesianas
W	módulo de resistência
ν	coeficiente de Poisson
ρ	densidade de massa

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver, implementar e analisar um modelo, aplicando-se o Método de Elementos Finitos (MEF), para um veículo mini-baja. As análises realizadas são do tipo estática linear, estática não linear e dinâmica não linear. A análise dinâmica não linear é o objetivo final deste trabalho, visando a simulação dinâmica de tensões. Todas as hipóteses e procedimentos adotados foram detalhados. Com este trabalho, é possível afirmar que a simulação dinâmica de tensões começa a se tornar viável, graças aos significativos avanços da capacidade de processamento dos microcomputadores. Ademais, a modelagem das rodas, pneus e suspensão para o cálculo dos esforços na estrutura do veículo agrega ao problema grandes deslocamentos o que impede resultados representativos através de análises lineares, obrigando a realização de análises não lineares para tal situação.

Abstract

This work is based on developing, implementing and analyzing a model, applying the Finite Elements Method (FEM) on a vehicle mini-baja. Three types of FEM's analyses were accomplished: Static Linear, Static Non linear and Dynamic Non linear. The main analysis type is the dynamic non linear because the most important objective of this work is to obtain the dynamic simulation of stresses. All hypotheses and adopted procedures are described in detail. Because of this work it is possible to affirm that the dynamic simulation of stresses begins to become viable, thanks to the significant progresses of the capacity of processing of the microcomputers. Also important is the fact that wheels, tires and suspensions were modeled to allow the implicit calculation of the efforts transmitted by the soil to the structure of the vehicle. However, this methodology obliges the realization of non linear analysis because of the great displacements generated by the suspension's mechanism.

Résumé

L'objectif de ce travail est de développer, de mettre en marche et d'analyser un modèle d'un véhicule du genre mini-baja en adoptant la méthode des éléments finis. Les analyses réalisées sont de trois genres: statique linéaire, statique non-linéaire et dynamique non-linéaire. L'objectif principal est celui de réaliser, avec succès, la simulation dynamique des tensions. Tous les procédés adoptés, ainsi que les hypothèses, sont détaillés. Après ce travail, il est possible d'affirmer que les simulations dynamiques commencent à devenir viables grâce aux développements de la capacité de traitement des ordinateurs. Finalement, la représentation des pneus, des roues et des suspensions pour transmettre les efforts du sol jusqu'à la structure, oblige la réalisation d'analyses non-linéaires à cause des grands déplacements dus aux mouvements du mécanisme de la suspension.

1. Introdução

Nos últimos anos, os sucessivos avanços na área de “hardware” têm levado a um crescimento exponencial da capacidade de processamento, instrumentalizando os engenheiros por meio de programas de computador, modernos e inovadores, como os de CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing) e CAE (Computer Aided Engineering). Os programas de CAD e CAM têm evoluído com o avanço contínuo de modelagem sólida e de ferramentas de desenvolvimento instaladas em rede. De maneira similar, o CAE cresceu com esse foco, bem como suas aplicações.

Muitas empresas, particularmente a indústria automotiva, em que o tempo de mercado é crítico, têm reduzido os testes em troca de simulações e CAE, que na maioria dos casos diminui a necessidade de teste, eliminando, até, essa necessidade em alguns casos.

Hoje, CAE e simulações têm várias funções para montadoras e fornecedores automotivos. Algumas empresas têm aplicado as atividades de CAE nas fases iniciais de desenvolvimento do produto, de forma a obter uma comprovação do projeto mesmo antes da construção do protótipo. Em outros casos, CAE e simulação permitiram aos engenheiros obter uma melhor visão de seus processos de desenvolvimento, a fim de estabelecer as limitações nos seus métodos, e projetar novos métodos, alcançando um produto de qualidade.

Neste contexto, é de vital importância para um engenheiro atualizado estar capacitado para aplicar o método de elementos finitos, tanto em análises

estáticas quanto em dinâmicas, satisfazendo os interesses das empresas e ocupando esse nicho de mercado. Contudo, esta capacitação não é trivial, exigindo um trabalho árduo e com afinco. De forma a realizar um trabalho compatível com a dificuldade exigida por um trabalho de formatura, optou-se por modelar um veículo mini-baja, particularmente o da equipe POLI-MOTOROLA, que participou da competição promovida pela SAE (Society of Automotive Engineers) em 2001, realizando análises estática e dinâmica para a estrutura em questão.

O esforço necessário para a realização de simulações dinâmicas é consideravelmente maior que o necessário para a realização de análises estáticas. Justamente por isso, aqui o objetivo principal é consecução de uma análise dinâmica da estrutura do veículo mini-baja. Será exposta, ao longo do presente texto, a modelagem adotada para análises estática e dinâmica, procurando sempre justificar as decisões de modelagem adotadas, assim como interpretar os resultados obtidos.

2. Modelagem

2.1. A Estrutura

O projeto da estrutura do veículo mini-baja estudado foi definida pelos membros da equipe respeitando todos os critérios de segurança impostos pelo regulamento da competição realizada pela SAE (veja Apêndice A). Além dos critérios impostos pelo regulamento, o design da estrutura dependeu, também, dos pontos de fixação dos componentes do veículo como motor, banco, CVT e suspensões traseira e dianteira.

Na seqüência, as figuras 1 e 2 apresentam os desenhos em CAD da estrutura com as cotas mais relevantes.

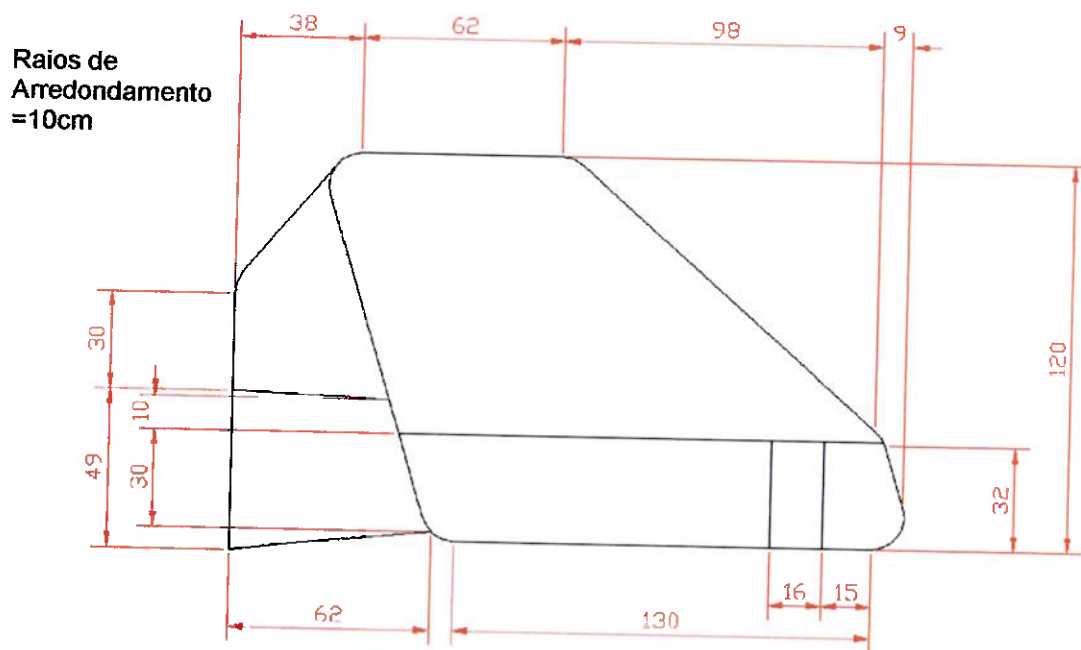


FIGURA 1: VISTA LATERAL DO VEÍCULO MINI-BAJA (MEDIDAS EM CM)

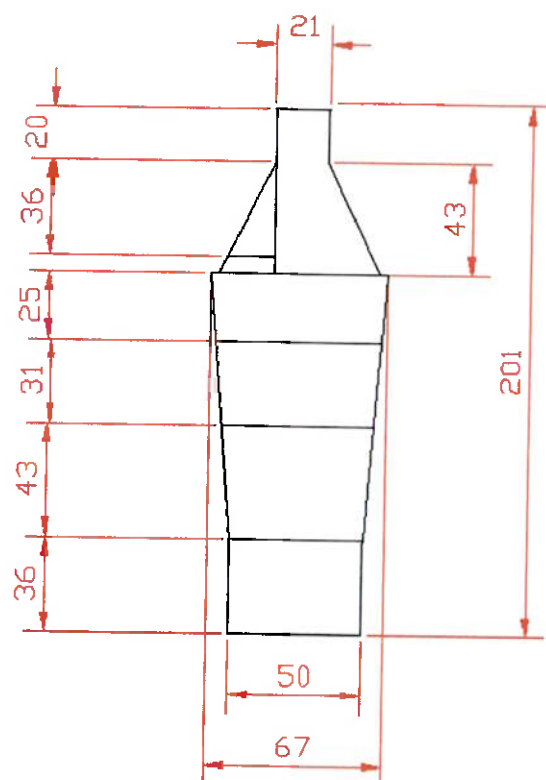


FIGURA 2: VISTA DA BASE DA ESTRUTURA (MEDIDAS EM CM)

Uma vez que o programa de elementos finitos a usar [ALGOR,2] tem uma boa interface de importação de desenhos do CAD, não foi preciso redesenhar a estrutura no programa bastando importá-la do CAD, o que permite a integração dos programas usados para os desenhos técnicos e para análises em elementos finitos. Entretanto, para a modelagem completa em elementos finitos é, imprescindível, discretizar a estrutura e associar-lhe elementos e materiais, etapa esta que se encontra detalhada na seqüência.

2.2. *Uso da Suspensão e Rodas*

Antes de abordar a associação de elementos à estrutura, é preciso ter claro todos os componentes que serão modelados junto com ela. Neste caso,

especificamente, os esforços transmitidos da suspensão para a estrutura são desconhecidos pois, na realidade, são conhecidos, apenas e com ressalvas, os deslocamentos das rodas. Desta forma, para que o programa compute implicitamente os esforços transmitidos do solo para o pneu, do pneu para a roda, da roda para a suspensão e da suspensão para a estrutura, todos esses componentes do veículo deverão ser representados no modelo.

Por exemplo, numa análise estática que simule o efeito da gravidade, sabe-se que as rodas do veículo estão em contato com o solo e, se no modelo estiverem representados os pneus, as rodas e as suspensões, implicitamente, os esforços transmitidos pelas suspensões à estrutura serão calculados pelo programa de MEF.

Indiscutivelmente, quanto mais forem respeitados os graus de liberdade e as dimensões geométricas do mecanismo das suspensões, tanto melhor será a estimativa dos esforços transmitidos à estrutura. Da mesma forma e por outro lado, quando o veículo passa por uma lombada, numa simulação dinâmica idealizada, admite-se, por simplificação, que os pneus estarão sempre em contato com o solo e, portanto, só se precisa impor o deslocamento dos pneus com o perfil exato de uma lombada padrão.

Do que precede, mesmo desejando-se analisar as tensões apenas na estrutura do veículo mini-baja, recomenda-se que estejam modelados os componentes mencionados (suspensões, rodas e pneus) para que os resultados das análises sejam mais representativos e para que possam ser colocadas condições de contorno de fato conhecidas, caracterizando-se a interação pneu-

solo. Entretanto, os resultados das tensões nesses componentes da suspensão não serão objeto de análise porque sua função, aqui, é de, simplesmente, transmitir adequadamente os esforços do solo à estrutura.

2.3. Elementos e Materiais

Para uma abordagem mais didática da definição dos elementos e materiais utilizados na representação do modelo, esse item será dividido em quatro subitens que corresponderão a:

- Estrutura: é o escopo das análises.
- Corpos: são corpos, por ela carregados, que têm massa relevante causando o aparecimento de esforços na estrutura (Piloto, Motor e CVT).
- Suspensões: são todos os componentes dos mecanismos das suspensões dianteira e traseira que transmitem esforços para a estrutura.
- Rodas/Pneus: o conjunto roda/pneu auxiliará na transmissão dos esforços do solo à estrutura, porém recebem uma abordagem distinta da das suspensões.

2.3.1. Estrutura

A estrutura é constituída por tubos e barras soldados. Apenas dois tipos de tubos foram utilizados na sua fabricação:

- Tubo de Aço cilíndrico com diâmetro de uma polegada (0,0254m) e parede interna de 0,00225m.
- Barra de Aço quadrada com lados de 0,02m.

Sendo as barras e tubos soldados uns aos outros pelas extremidades, o melhor tipo de elemento disponível para representá-los, dados os comprimentos relativamente grandes, é o elemento de viga que, no ALGOR, é chamado de "beam". Vale ressaltar que apesar do elemento de viga ser estrutural, as vigas foram discretizadas em elementos de, aproximadamente, 0,01m de comprimento, para que o efeito de inércia seja computado adequadamente na análise dinâmica [3].

A seguir, têm-se os cálculos das propriedades geométricas a serem especificadas no programa como propriedades dos elementos de Viga:

❖ Tubos:

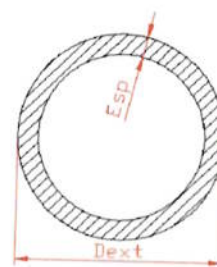
- Área da Secção Transversal:

$$A = \pi \left[\left(\frac{D_{ext}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{ext}}{2} - Esp_{parede} \right)^2 \right] = \pi \left[\left(\frac{0,0254}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,0254}{2} - 0,00225 \right)^2 \right] = 1,6364 \cdot 10^{-4} m^2$$

- Inércia à Flexão:

$$I = \frac{\pi}{64} \left[(D_{ext})^4 - (D_{ext} - 2Esp_{parede})^4 \right] =$$

$$= \frac{\pi}{64} \left[(0,0254)^4 - (0,0254 - 2 \cdot 0,00225)^4 \right] = 1,10657 \cdot 10^{-8} m^4$$



- Constante à Torção

$$J = \frac{\pi}{32} \left[(D_{ext})^4 - (D_{ext} - 2E_{sp_{parede}})^4 \right] =$$

$$= \frac{\pi}{32} \left[(0,0254)^4 - (0,0254 - 2 \cdot 0,00225)^4 \right] = 2,21313 \cdot 10^{-8} m^4$$

- Módulo de Resistência à Flexão:

$$W = 2 \frac{I}{D_{ext}} = \frac{2 \cdot 1,10657e^{-8}}{0,0254} = 1,74262 \cdot 10^{-6} m^3$$

❖ Barras Quadradas:

- Área da Secção Transversal:

$$A = L^2 = (0,02)^2 = 4,0 \cdot 10^{-4} m^2$$

- Inércia à Flexão:

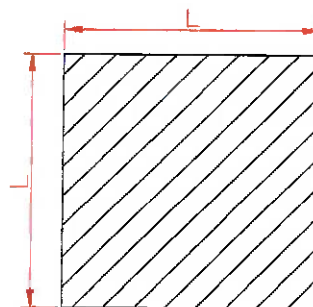
$$I = \frac{L^4}{12} = \frac{0,02^4}{12} = 1,3333 \cdot 10^{-8} m^4$$

- Constante à Torção

$$J = \frac{L^4}{6} = \frac{0,02^4}{6} = 2,6666 \cdot 10^{-8} m^4$$

- Módulo de Resistência à Flexão:

$$W = 2 \frac{I}{l} = \frac{2 \cdot 1,3333e^{-8}}{0,02} = 1,3333 \cdot 10^{-6} m^3$$



Os tubos e as barras, em aço, são de mesmo material. Como consequência as propriedades associadas aos materiais, tanto dos tubos quanto das barras, estão listadas a seguir:

Módulo de Elasticidade: 207GPa.

Densidade de Massa: 7850 kg/m³.

Coefficiente de Poisson: 0,3.

A figura 3 apresenta a parte da estrutura à qual foram associadas as propriedades geométricas de tubo, calculadas acima, enquanto a figura 4 mostra a quais trechos da estrutura foram associadas as propriedades geométricas de barra, também calculadas acima. A figura 5 mostra todo o conjunto da estrutura, para o qual foram associadas as propriedades de material do aço.

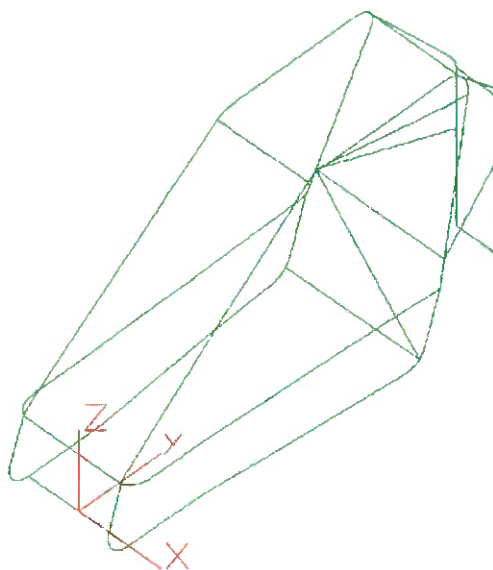


FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO DOS TUBOS DA ESTRUTURA.

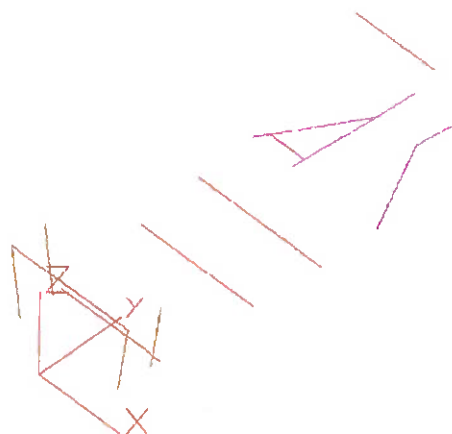


FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DAS BARRAS DA ESTRUTURA

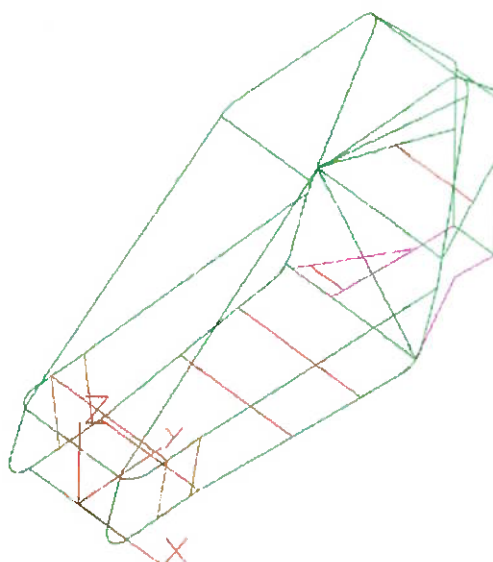


FIGURA 5: CONJUNTO DE TUBOS E BARRAS DE AÇO FORMANDO A ESTRUTURA

2.3.2. *Corpos*

Como já foi afirmado anteriormente, a estrutura do veículo transporta alguns corpos que têm uma massa considerável e, portanto, devem estar representados no modelo. Sendo assim, três corpos serão modelados, sendo eles:

- Piloto: 95kg.
- Motor: 22kg.
- CVT: 12kg.

Para maior representatividade do modelo, estes corpos foram fixados à estrutura o mais próximo possível dos pontos de fixação de fabricação. Lembrando que o modelo deve, também, focar as análises dinâmicas, e, então, tem de ser simplificado para não tornar a análise inviável, os corpos foram modelados por paralelepípedos. Contudo, tentou-se fazer com que os paralelepípedos tivessem o mesmo centro de gravidade estimado para os corpos que eles representam.

Os corpos foram considerados elementos sólidos o que implicou na utilização dos elementos chamados, no ALGOR, de "Brick". Este tipo de elemento não precisa de definições de propriedades geométricas bastando a especificação das propriedades de material. Isto posto, ressalte-se que tais corpos não têm função estrutural ou que, no máximo, ela é reduzida, de modo que o módulo de elasticidade associado é, para os propósitos mencionados, dez vezes menor que o do material da estrutura.

Para cada um dos corpos, cujas representações se vê nas figuras 6, 7 e 8, a densidade de massa foi calculada de forma que o corpo, com as medidas utilizadas no modelo, adquirisse a massa do corpo que se deseja representar.

Assim:

- Para o corpo do piloto de dimensões: 0,2X0,25X0,315m

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{95}{0,2 \cdot 0,25 \cdot 0,315} = 6031,75 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- Para o corpo do Motor de dimensões: 0,175X0,208X0,20m

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{22}{0,175 \cdot 0,208 \cdot 0,2} = 3021,98 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- Para o corpo do CVT de dimensões: 0,09X0,15X0,29m

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{12}{0,09 \cdot 0,15 \cdot 0,29} = 3065,13 \text{ kg} / \text{m}^3$$

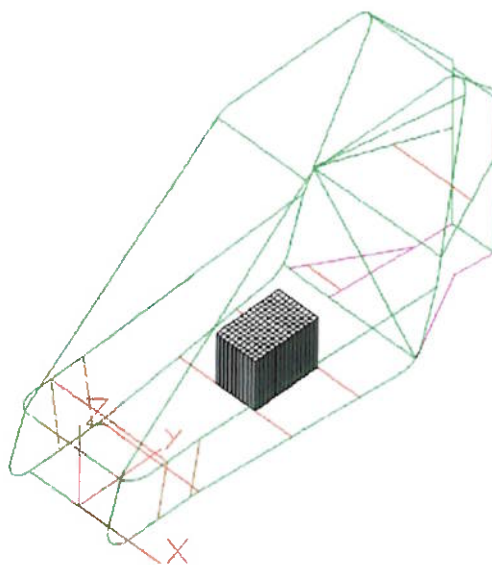


FIGURA 6: REPRESENTAÇÃO DO CORPO DO PILOTO.

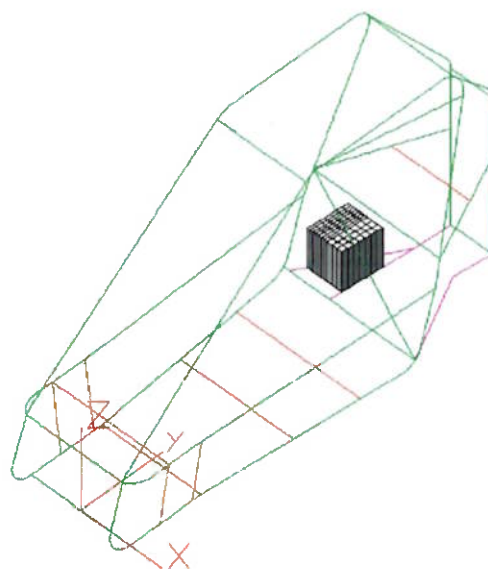


FIGURA 7: REPRESENTAÇÃO DO CORPO DO MOTOR.

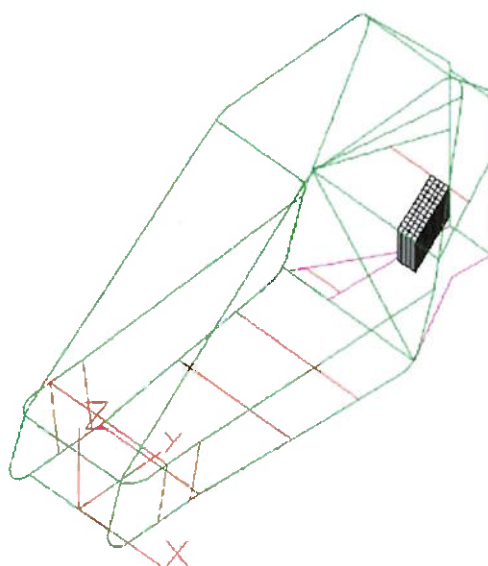


FIGURA 8: REPRESENTAÇÃO DO CORPO DO CVT.

2.3.3. Suspensões

O conjunto de suspensão do veículo é de vital importância na presente modelagem. Isto porque, ele tem a função de transmitir adequadamente os esforços da roda à estrutura e, portanto, a representação precisa do conjunto culminará, indubitavelmente, num melhor cálculo dos esforços aplicados à estrutura, dando maior credibilidade aos resultados obtidos pelas análises em elementos finitos. Entretanto, o conjunto de suspensão implica, como dificuldade extra, na necessidade de se respeitar os graus de liberdade do mecanismo definidos no projeto do conjunto.

O conjunto de suspensão é composto por dois tipos de elementos: viga ("beam") e treliça ("truss"). A viga é usada para representar componentes fixos do conjunto, enquanto a treliça é usada para representar o conjunto mola/amortecedor e hastes que compõem o mecanismo da suspensão. Como não se pretende obter resultados de tensão nesses componentes, as vigas e hastes, tanto da suspensão traseira quanto da dianteira, receberam as seguintes propriedades geométricas:

❖ As Vigas foram considerados barras circulares de 0,01m de diâmetro. Assim:

- Área da Secção Transversal:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,01}{2} \right)^2 = 7,854 \cdot 10^{-5} m^2$$

- Inércia à Flexão:

$$I = \pi \frac{D^4}{64} = \pi \frac{0,01^4}{64} = 4,909 \cdot 10^{-10} m^4$$

- Constante à Torção

$$J = \pi \frac{D^4}{32} = \pi \frac{0,01^4}{32} = 9,817 \cdot 10^{-10} m^4$$

- Módulo de Resistência à Flexão:

$$W = 2 \frac{I}{D} = \frac{2 \cdot 4,909 \cdot 10^{-10}}{0,01} = 9,817 \cdot 10^{-8} m^3$$

❖ As hastes foram modeladas como treliças ("truss") com a área de seção transversal de $10 \cdot 10^{-4} m^2$.

O material associado a estes dois tipos de elementos representa o aço e, por isso, aplicou-se as seguintes propriedades:

Módulo de Elasticidade: 207GPa.

Densidade de Massa: 7850 kg/m³.

Coefficiente de Poisson: 0,3.

2.3.3.1. Suspensão Dianteira

A suspensão dianteira é do tipo duplo A, sendo assim, as extremidades das hastes, que o compõe, são articuladas o que explica a adoção de elementos de treliça para a modelagem desse componente.

O cubo da roda e o eixo são componentes fixos e, assim, foram representados por elementos de viga. Sabendo que os conjuntos

molasses/amortecedores são articulados em suas extremidades, adotou-se para eles elementos de treliça. Porém, para uma satisfatória representação da constante elástica das molasses, criou-se um novo grupo de elemento treliça. Ademais, sabe-se que a constante elástica de uma treliça é dada por:

$$k = \frac{EA}{L}$$

Assim, aplicou-se o valor de L à área da treliça fazendo-se com que o valor da constante elástica desejado possa ser definido, diretamente, pelo módulo de elasticidade do material. No caso da mola dianteira, as propriedades usadas estão resumidas a seguir:

- Área= $L=0,42\text{m}^2$.
- Módulo de Elasticidade: 20000Pa (Valor estimado para k , [8]).
- Coeficiente de Poisson: 0,3.
- Densidade de Massa: 0 kg/m^3 (é nula para que a dimensão desproporcional da área da seção transversal não implique numa massa do componente, também, desproporcional).
- Constante de Amortecimento: 2000N/m² (Pode ser definida apenas para a análise dinâmicas, [8]).

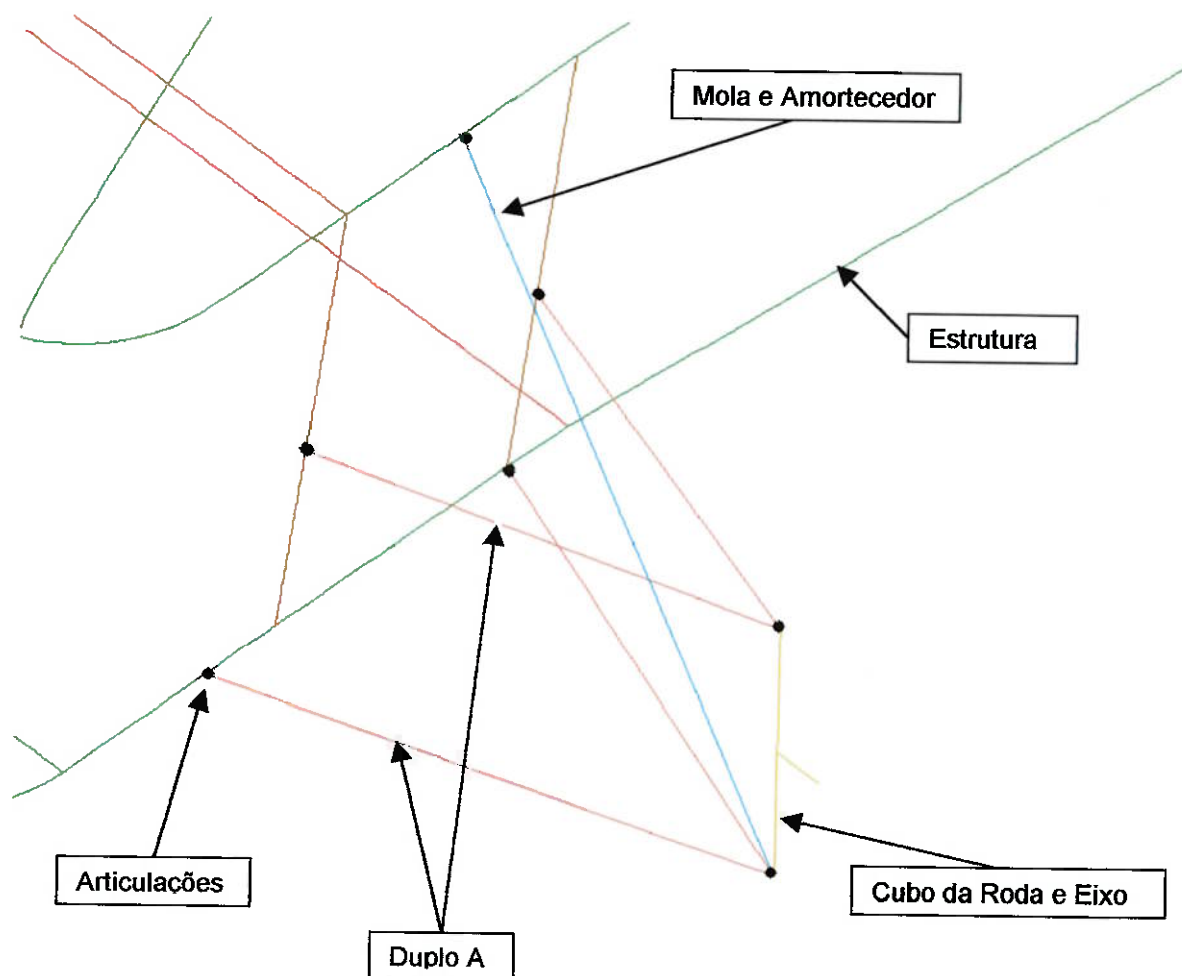


FIGURA 9: MODELO DO CONJUNTO COMPLETO DA SUSPENSÃO DIANTEIRA

2.3.3.2. Suspensão Traseira

O procedimento, quanto ao conjunto mola/amortecedor da suspensão traseira, foi análogo ao da suspensão dianteira, mudando apenas o comprimento do conjunto. Seguem os valores utilizados na sua definição:

- Área=L=0,90m².
- Módulo de Elasticidade: 20000Pa (Valor estimado para k, [8]).
- Coeficiente de Poisson: 0,3.

- Densidade de Massa: 0 kg/m^3 (é nula para que a dimensão desproporcional da área da seção transversal não implique numa massa do componente, também, desproporcional).
- Constante de Amortecimento: 2000 N/m^2 (Pode ser definida apenas para a análise dinâmicas, [8]).

O sistema da suspensão traseira é uma simplificação da suspensão McPherson [7], mas o importante para este trabalho é que o mecanismo é composto por uma haste engastada em uma das suas extremidades. Para tornar sua modelagem possível, ela foi definida como um elemento de viga padrão do conjunto de suspensão (definido acima) e, em seguida, em uma de suas extremidades liberou-se todas as rotações. Esse procedimento é realizado, no ALGOR, através do comando "End Release". A seguir na figura 10, tem-se a suspensão traseira apresentada, com o círculo laranja indicando a extremidade da viga que foi liberada.

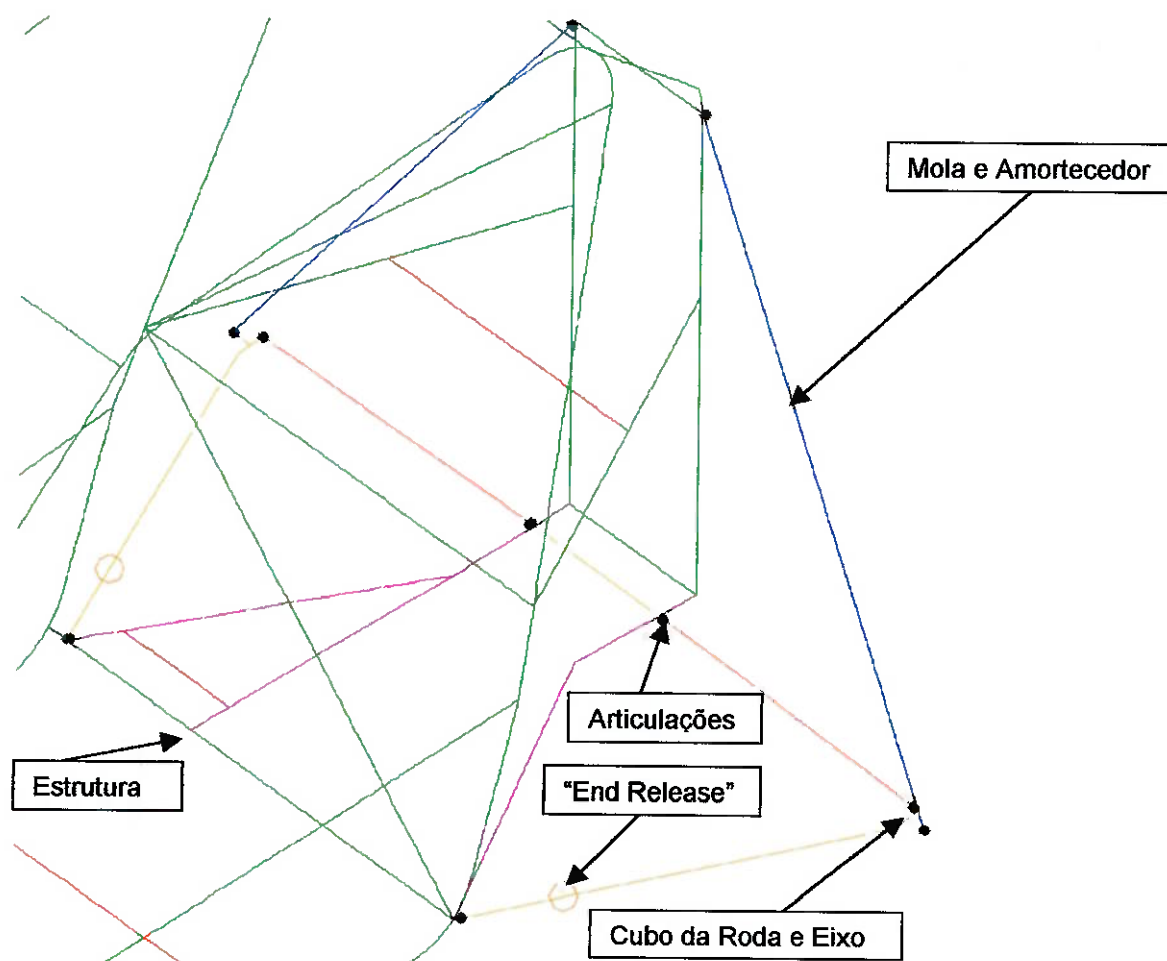


FIGURA 10: MODELO DO CONJUNTO COMPLETO DA SUSPENSÃO TRASEIRA

2.3.4. Rodas/Pneus

Assim como as suspensões dianteira e traseira, o conjunto rodas/pneus são relevantes na adequada transmissão de esforços do solo à estrutura. Porém, não se deseja obter valores de tensões representativas nesses componentes e, por isso, eles podem ser modelados com menor detalhe. Não obstante, vale lembrar que uma satisfatória representação do contato pneu/solo passa por análises não lineares de contato e de grandes deslocamentos pois, as grandes

deformações sofridas pela borracha do pneu fazem com que a superfície de contato, entre ela e o solo, dependa drasticamente do carregamento aplicado. Uma vez que essas não linearidades não são o escopo principal do presente trabalho, tanto os pneus quanto as rodas serão considerados corpos rígidos. De qualquer forma, procurou-se associar aos conjuntos rodas/pneus o valor de sua massa, devido ao interesse de se realizar análises dinâmicas.

Neste contexto, respeitando-se as dimensões como apresentadas na figura 11, as rodas foram representadas por raios de elementos de viga ("beam") enquanto os pneus por elementos sólidos ("brick"). A figura 12 apresenta um conjunto roda/pneu em perspectiva.

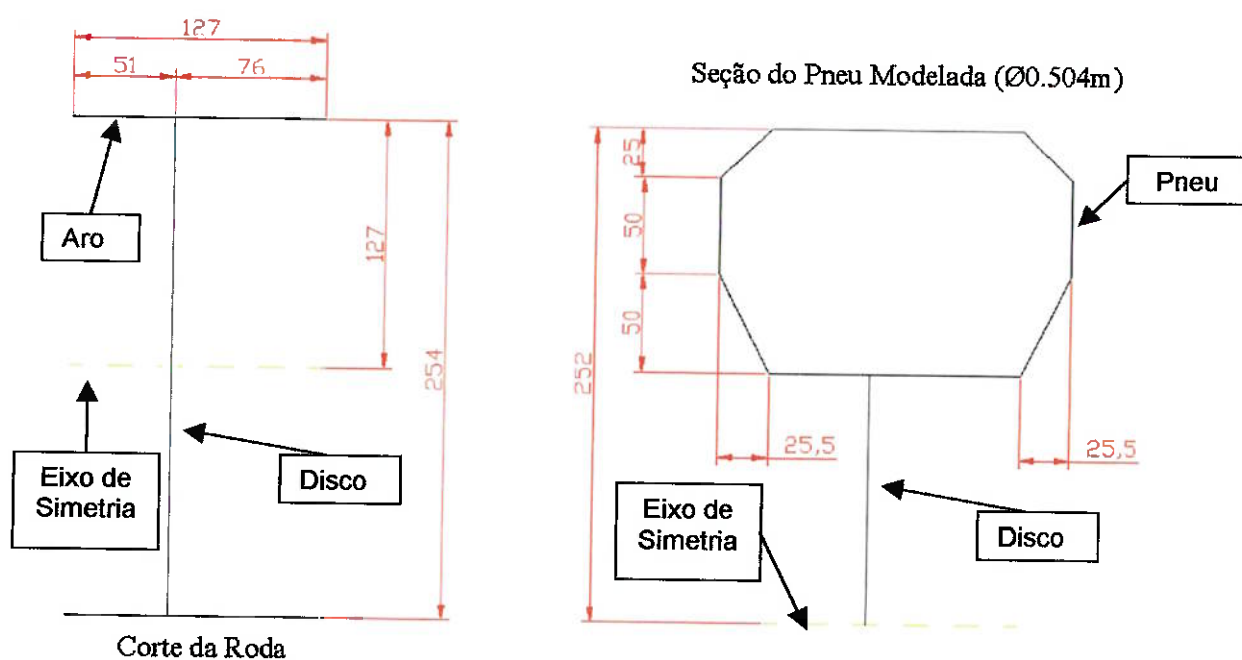


FIGURA 11: DIMENSÕES PRINCIPAIS DE PNEU E RODA IDEALIZADOS (EM MM).

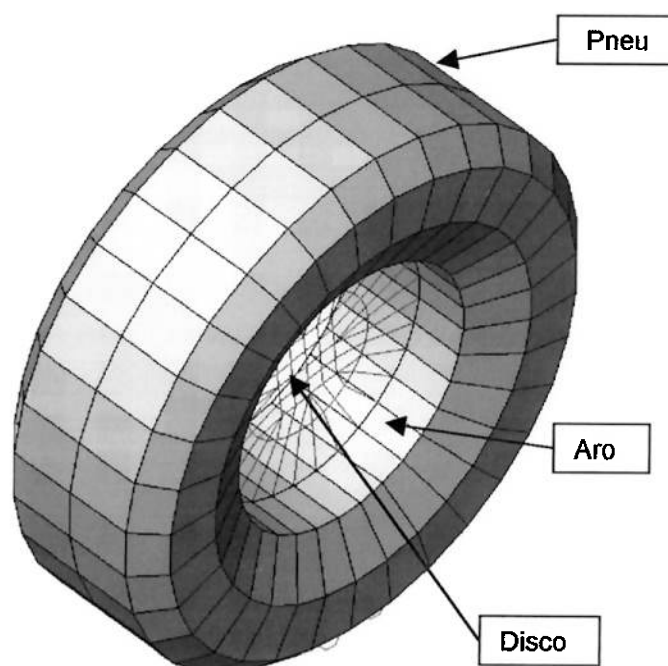


FIGURA 12: ILUSTRAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DO CONJUNTO RODA PNEU

Para obter as rodas e os pneus “rígidos” em relação ao resto da suspensão, o módulo de elasticidade a eles associados foi tomado igual ao do material da estrutura (207GPa).

Por outro lado, o peso da roda foi mantido nulo ($\rho = 0 \text{ kg/m}^3$), e calibrando-se o valor da densidade de massa do pneu de sorte que o massa total de cada conjunto roda/pneu fosse 2,5kg aproximadamente. Sendo assim, adotou-se para o pneu densidade de 110 kg/m^3 .

Como não se deseja observar as tensões nas rodas, as propriedades geométricas foram escolhidas para que nelas as tensões fossem baixas. Com esse intuito, os raios do disco foram considerados barras circulares de 0,01m de diâmetro. Assim:

- Área da Secção Transversal:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,01}{2} \right)^2 = 7,854 \cdot 10^{-5} m^2$$

- Inércia à Flexão:

$$I = \pi \frac{D^4}{64} = \pi \frac{0,01^4}{64} = 4,909 \cdot 10^{-10} m^4$$

- Constante à Torção

$$J = \pi \frac{D^4}{32} = \pi \frac{0,01^4}{32} = 9,817 \cdot 10^{-10} m^4$$

- Módulo de Resistência à Flexão:

$$W = 2 \frac{I}{D} = \frac{2 \cdot 4,909 \cdot 10^{-10}}{0,01} = 9,817 \cdot 10^{-8} m^3$$

2.3.5. Considerações sobre a Modelagem

Neste capítulo, todos os componentes da estrutura tiveram suas representações em elementos finitos exaustivamente detalhadas (o modelo completo é mostrado na figura 13). Desta forma, restam, ainda, as definições das condições de contorno e dos carregamentos a serem aplicados à estrutura, sob aspecto geral de que para cada um dos tipos distintos de análise (estática ou dinâmica) tais definições passam por processos distintos. Assim, o presente texto contempla essa distinção ao elaborar um capítulo para cada tipo de análise, como adiante se vê.

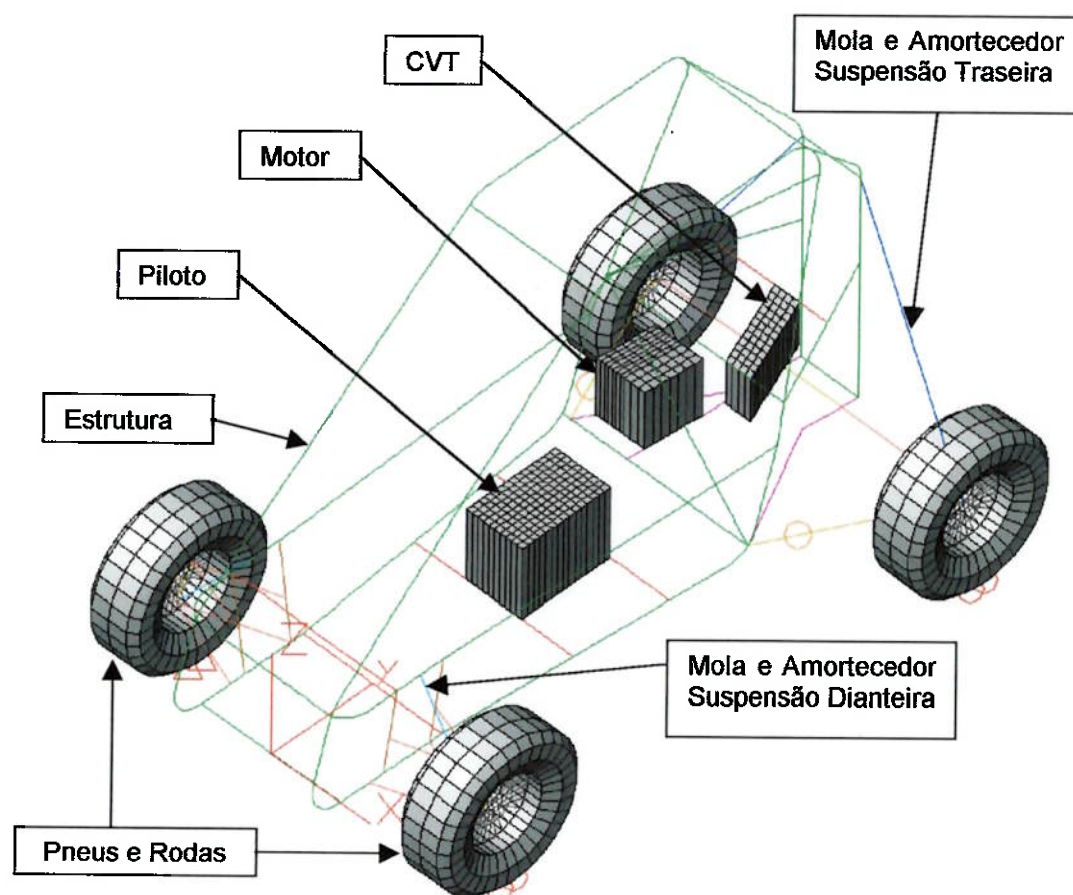


FIGURA 13: MODELO COMPLETO DO MINI-BAJA

3. Análises Estáticas

Estando definidos os elementos, suas propriedades dos materiais e suas propriedades geométricas restam, para a realização de análises pelo método de elementos finitos, as definições das condições de contorno e dos carregamentos a fim de se obter resultados de tensões. Desta forma, este capítulo contempla a especificação das condições de contorno, dos carregamentos e, finalmente, a apresentação e discussão dos resultados obtidos, neste capítulo sob a suposição de que os esforços de inércia não são contabilizados diretamente como resultado dos próprios cálculos. Nesse contexto, recorre-se ao conceito de aceleração estática equivalente através do aumento fictício da aceleração da gravidade de modo a cobrir, indiretamente os efeitos da inércia.

3.1. Condições de Contorno e Carregamento

Como já foi previamente mencionado, a respeito de um veículo pode-se considerar certo, apenas, o fato de que algumas de suas rodas estarão sempre em contato com o solo, para as situações em que importa avaliar tensões. Sendo assim, para simular tal fenômeno é necessário que os nós na base dos pneus tenham seus deslocamentos na direção Z restritos. Por outro lado, para evitar movimentos de corpo rígido nas direções X e Y algum nó deverá estar restrito nessas direções. Assume-se, também, que os deslocamentos relativos entre as bases dos pneus são permitidos (isso equivale a dizer que não há atrito entre os pneus e o solo, sendo, então, esta, uma limitação do modelo). Neste contexto, a

figura 14 mostra como os nós nas bases dos pneus podem ser restringidos no plano XY de forma que as hipóteses aqui relatadas sejam respeitadas.

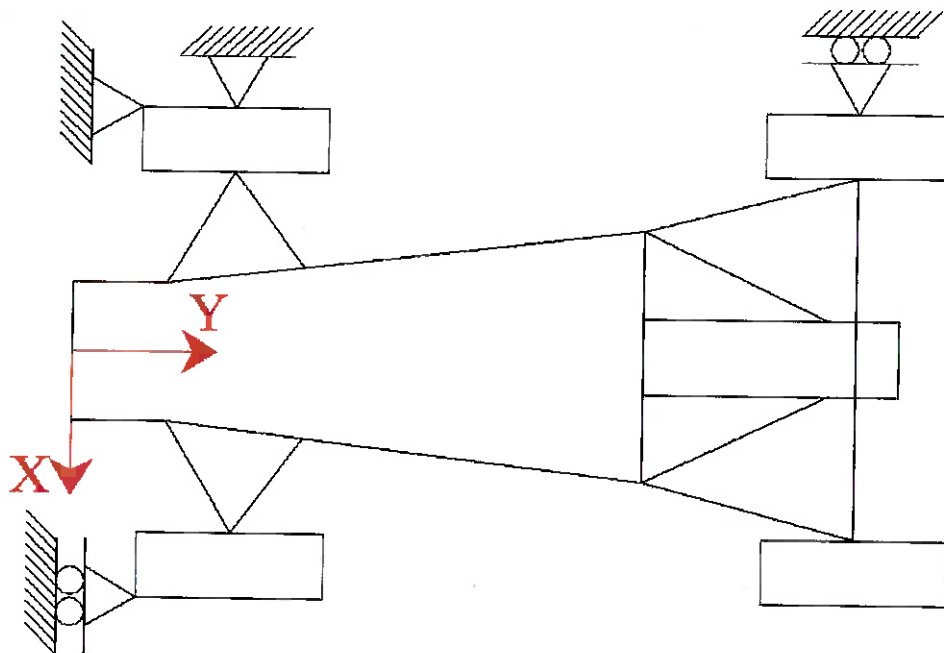


FIGURA 14: CONDIÇÕES DE CONTORNO NO PLANO XY.

Este tipo de estrutura tubular tem como seu ponto fraco a resistência à torção, assim, três casos diferentes de análise serão realizados.

3.1.1. Primeiro Caso

No primeiro caso, os nós das bases de todos os quatro pneus estarão com o deslocamento em Z restrito, simulando contato completo com o solo. A eventual torção na estrutura decorrerá unicamente pelo carregamento escolhido. Nesta abordagem, aplicar-se-á uma aceleração estática, supostamente, equivalente à aceleração dinâmica crítica. O valor adotado por eixo é:

- -10m/s^2 no eixo X (aceleração lateral de 1G).

- -10m/s^2 no eixo Y (aceleração de frenagem de 1G, a desaceleração aferida oficialmente na competição foi de 9m/s^2).
- -15m/s^2 no eixo Z (gravidade aparente de 1,5G estimada como situação crítica).

3.1.2. Segundo Caso

Para o segundo caso, admite-se que uma das rodas dianteiras, aqui a direita, perdeu o contato com o solo, por isso, os nós da base do pneu em questão passam a ter movimento livre na direção Z. Simultaneamente, a estrutura fica submetida apenas ao efeito da gravidade ($1\text{G}=10\text{m/s}^2$).

3.1.3. Terceiro Caso

Como a estrutura não é simétrica, o estudo das tensões para o caso em que o pneu dianteiro esquerdo perde contato com o solo não deve ser desprezado. Portanto, o terceiro caso é análogo ao segundo. A estrutura está submetida apenas ao efeito da gravidade, porém, são os nós da base do pneu dianteiro esquerdo que têm movimento livre na direção Z.

3.1.4. Considerações sobre os Casos de Análise Estática

O veículo mini-baja é um off-road, ou seja, um veículo que percorre terrenos bastante acidentados. Tal fato faz com que um dos pneus perder o contato com o solo seja uma ocorrência bem freqüente.

Em análises prévias para a definição dos casos, simulou-se a perda de contato das rodas traseiras, contudo, observou-se reações do solo para baixo no

pneu dianteiro diagonalmente oposto ao pneu traseiro liberado, o que não representa a realidade, pois o solo estaria impedindo o pneu de subir, isto inviabiliza a veracidade do resultado obtido para a dada configuração das condições de contorno. Conclui-se, então, que devido à posição do centro de gravidade do conjunto, o veículo tende a recair sempre sobre as duas rodas traseiras.

3.2. Apresentação e Discussão dos Resultados

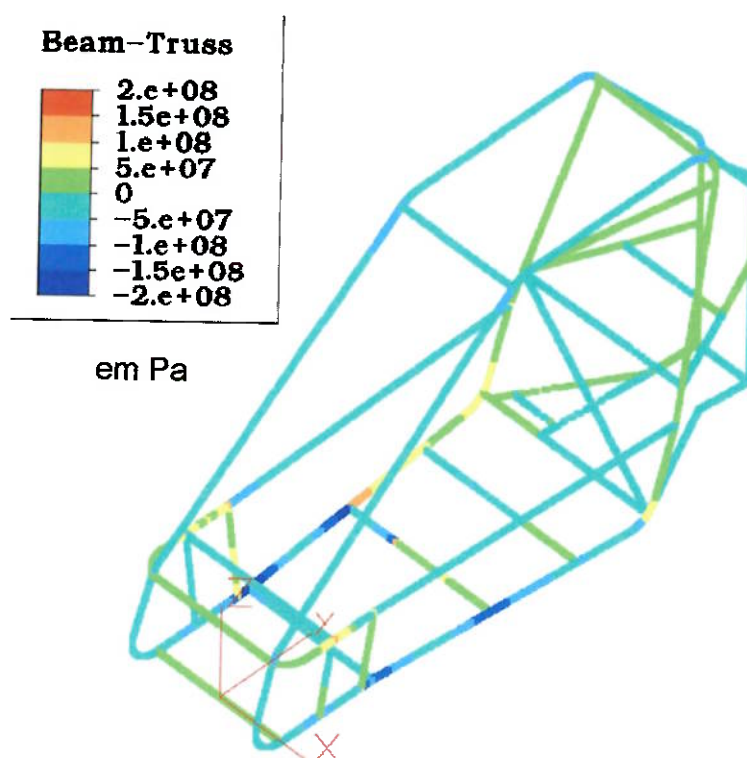


FIGURA 15: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA ESTRUTURA SOB O CARREGAMENTO DO CASO 1

No caso 1, os valores máximos de tensão de tração e compressão segundo o critério de VonMises foram, respectivamente, 122MPa e 208MPa. Observa-se que para este carregamento tido como crítico, os valores máximos de tensão estão abaixo ou próximos do limite de fadiga de um aço 1020 (200MPa). Sendo assim, de acordo com esta análise, a estrutura encontra-se bem dimensionada, inclusive para a fadiga do material.

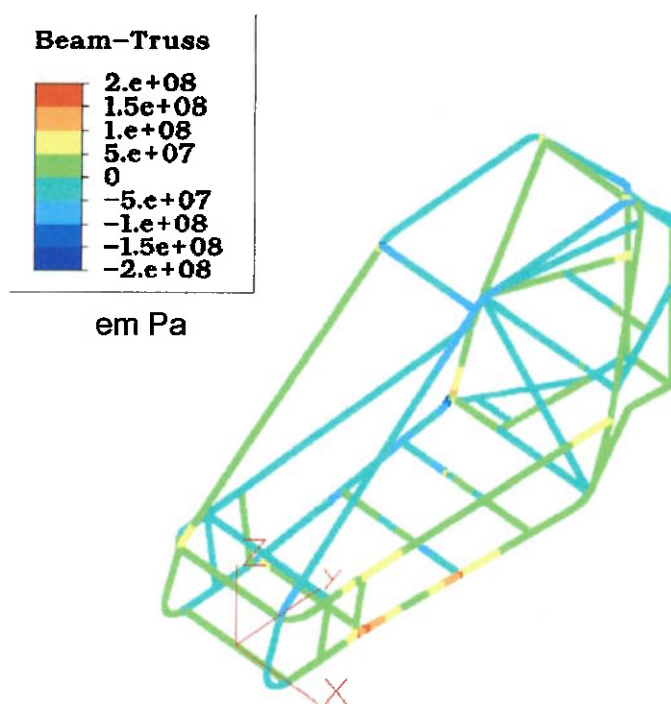


FIGURA 16: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA ESTRUTURA SOB O CARREGAMENTO DO CASO 2

No caso 2, com a roda dianteira direita sem contato com o solo, os valores máximos de tensão de tração e compressão segundo o critério de VonMises foram, respectivamente, 138MPa e 168MPa. Isto dá uma certa folga de

carregamento para que a estrutura esteja dimensionada à fadiga. Como a análise é linear, a valor de 1,19G (200/168) de gravidade com a roda direita sem contato com o solo garante que o valor máximo de tensão na estrutura não ultrapasse limite de fadiga de um aço 1020 (200MPa).

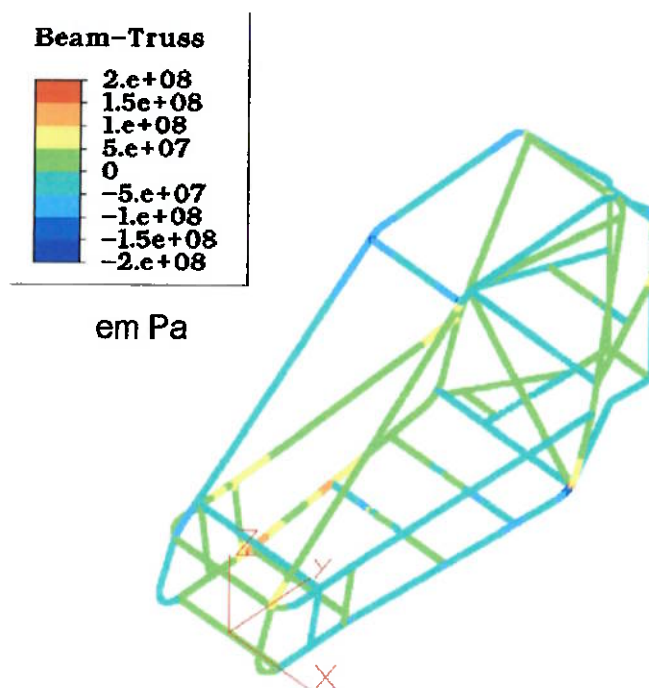


FIGURA 17: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA ESTRUTURA SOB O CARREGAMENTO DO CASO 3

No caso 3, com a roda dianteira esquerda sem contato com o solo, os valores máximos de tensão de tração e compressão segundo o critério de VonMises foram, respectivamente, 135MPa e 161MPa. Isto dá uma certa folga de carregamento para que a estrutura esteja dimensionada à fadiga. Como a análise é linear, a valor de 1,24G (200/161) de gravidade com a roda esquerda sem

contato com o solo garante que o valor máximo de tensão na estrutura não ultrapasse limite de fadiga de um aço 1020 (200MPa).

Comparando-se o caso 2 com o caso 3, vê-se que os resultados são próximos e, que a assimetria da estrutura não provoca grandes variações de tensão em função das condições aplicadas.

Pela análise linear estática, tendo como critério carregamentos estáticos típicos, estimados como representativos, e comparando os valores de tensão atuando na estrutura com o limite à fadiga do aço 1020, é possível afirmar que a estrutura encontra-se bem dimensionada à fadiga.

4. Análise Dinâmica

Sem a menor sombra de dúvidas, a análise dinâmica exige um esforço significativamente maior do que o despendido numa análise estática. Diversos testes devem ser realizados para garantir que todos os fenômenos (gravidade, deslocamento dos pneus) estejam representados satisfatoriamente. Ademais, a todo instante, o analista precisa se preocupar com o tamanho do modelo, pois, cada passo da análise dinâmica corresponde a uma análise estática.

De pronto, fica claro que é imprescindível esclarecer ao leitor porque a análise não foi realizada no campo das frequências, com a chamada superposição modal [3, 4, 5], uma vez que ela é computacionalmente mais eficiente do que o método de integração direta. E a resposta é: “por causa do amortecedor”. No caso da superposição modal, devido ao seu equacionamento, não é possível representar o amortecedor concentrado, o seu efeito fica distribuído em toda a estrutura. Caso tivesse sido usada a superposição modal, o intuito de se modelar o conjunto suspensão e roda para transmitir adequadamente os esforços à estrutura, seria contrariado, uma vez que o amortecedor concentrado é uma fonte significativa de esforços dinâmicos na estrutura de apoio da suspensão. Conseqüentemente, a análise dinâmica por integração direta tornou-se inevitável, pois, nela é possível aplicar amortecedores concentrados, sendo seus efeitos presentes na região de atuação.

Por outro lado, como são conhecidas as posições dos pneus, que seguem o perfil da pista a ser percorrida, tornou-se indispensável impor o deslocamento

vertical dos nós na base dos pneus. Necessidade está que, através do programa ALGOR, só é satisfeita, realizando-se a análise no módulo Mechanical Event Simulation (Simulação de Eventos Mecânicos) que apresenta o inconveniente de realizar apenas análises completas, ou seja, dinâmicas não lineares com integração direta.

Devido às duas razões acima apresentadas, as dificuldades esperadas aumentaram tornando, mais desafiador o objetivo de realizar uma análise dinâmica do veículo mini-baja que fosse representativa, e que atendesse aos objetivos propostos.

4.1. Condições de Contorno e Perfil de Teste

Analogamente a o que ocorreu na análise estática, na análise dinâmica sabe-se, apenas, que os pneus estão em contato com solo. Por isso, a análise dinâmica consistiu em travar os deslocamentos no plano XY dos nós da base de todos os pneus conforme foi descrito no item 3.1 figura 14. Contudo, para a análise dinâmica esses nós tiveram um deslocamento na direção Z variando no tempo, imposto segundo um perfil de pista tido como relevante.

Considerou-se o veículo a uma velocidade de 10m/s (ou seja, 36Km/h) correspondente à velocidade máxima aferida na competição de 32 km/h, admitindo-se, também, que uma lombada de 1m de comprimento e 0,04m de altura é um obstáculo razoável para o escopo do trabalho.

O perfil da pista imposto prevê que o veículo transponha a lombada primeiro transversalmente, seguido de duas transposições oblíquas, uma 45° para

o lado esquerdo e outra, também a 45° , para o lado direito. A figura 18 mostra o perfil especificado, enquanto as figuras 19 e 20 mostram o deslocamento imposto a cada um dos pneus em função do tempo para o veículo a 10m/s. As transposições oblíquas visam impor esforços de torção à estrutura que, como já foi dito anteriormente, são os mais críticos para este tipo de estrutura.

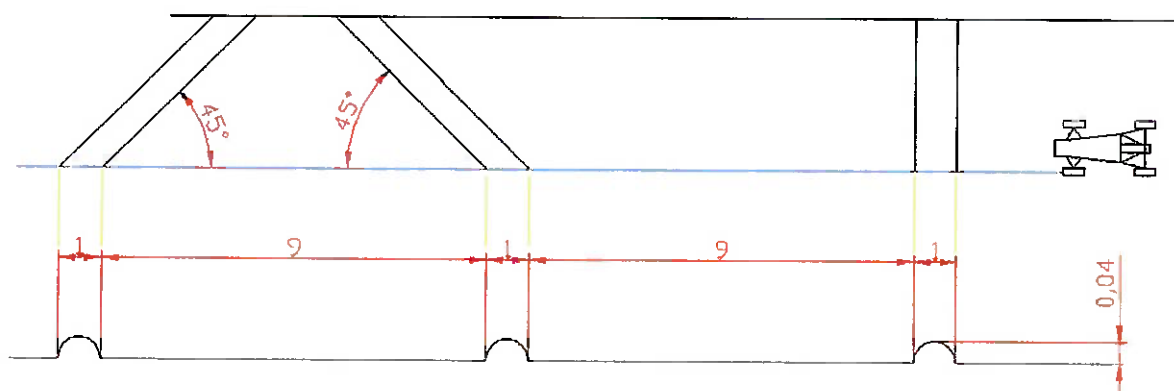


FIGURA 18: PERFIL DE PISTA SIMULADO.

É importante ressaltar que a distância entre eixos do veículo é de 1,67m e, por isso, a defasagem entre os pneus dianteiros e traseiros deve ser de 0,167s para o veículo a 10 m/s de velocidade. O mesmo pode ser dito para a defasagem entre os pneus dos lados esquerdo e direito que distam de 1,14m resultando numa defasagem de 0,114s.

A distância entre as lombadas sucessivas foi escolhida de forma que o veículo já tivesse atingido o equilíbrio após a passagem pelo obstáculo anterior, resultando num tempo total de simulação de 3,5s.

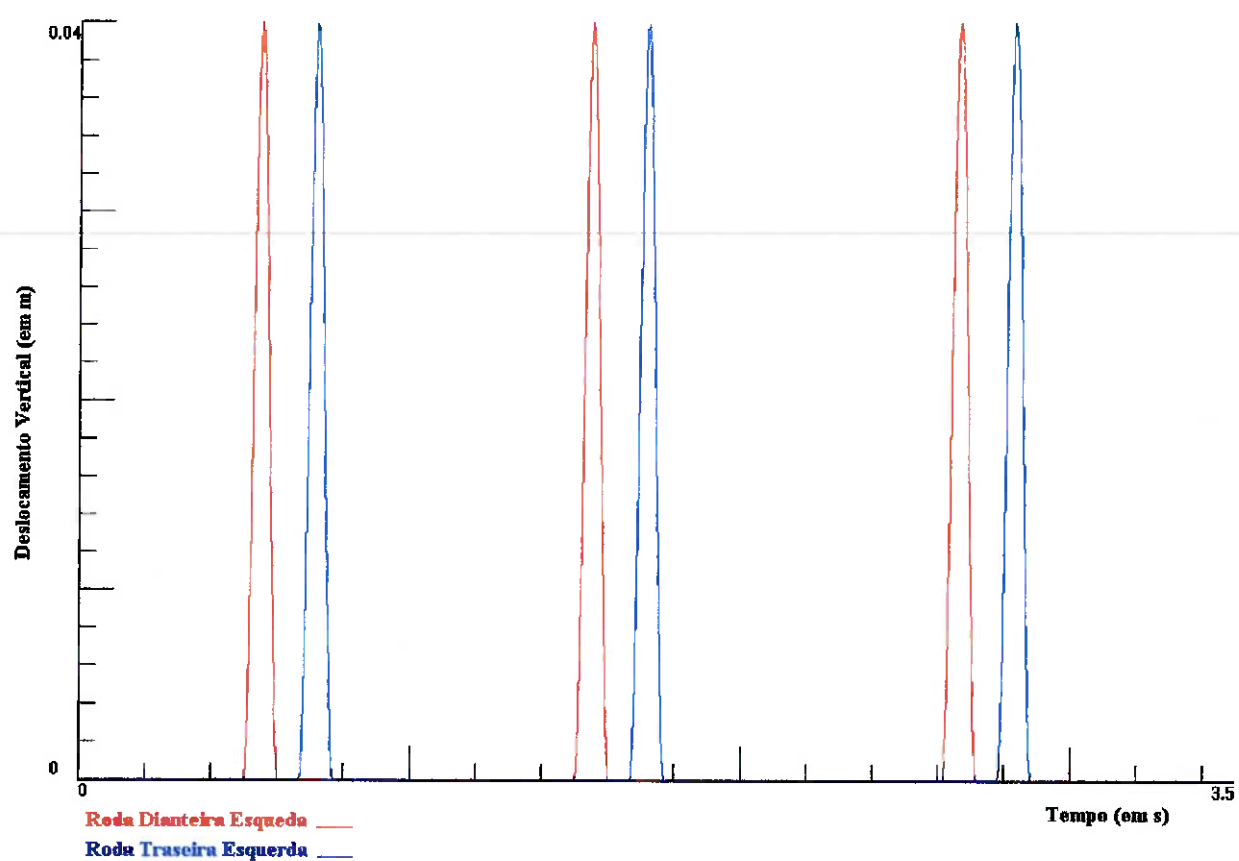


FIGURA 19: DESLOCAMENTO VERTICAL IMPOSTO ÀS RODAS ESQUERDAS

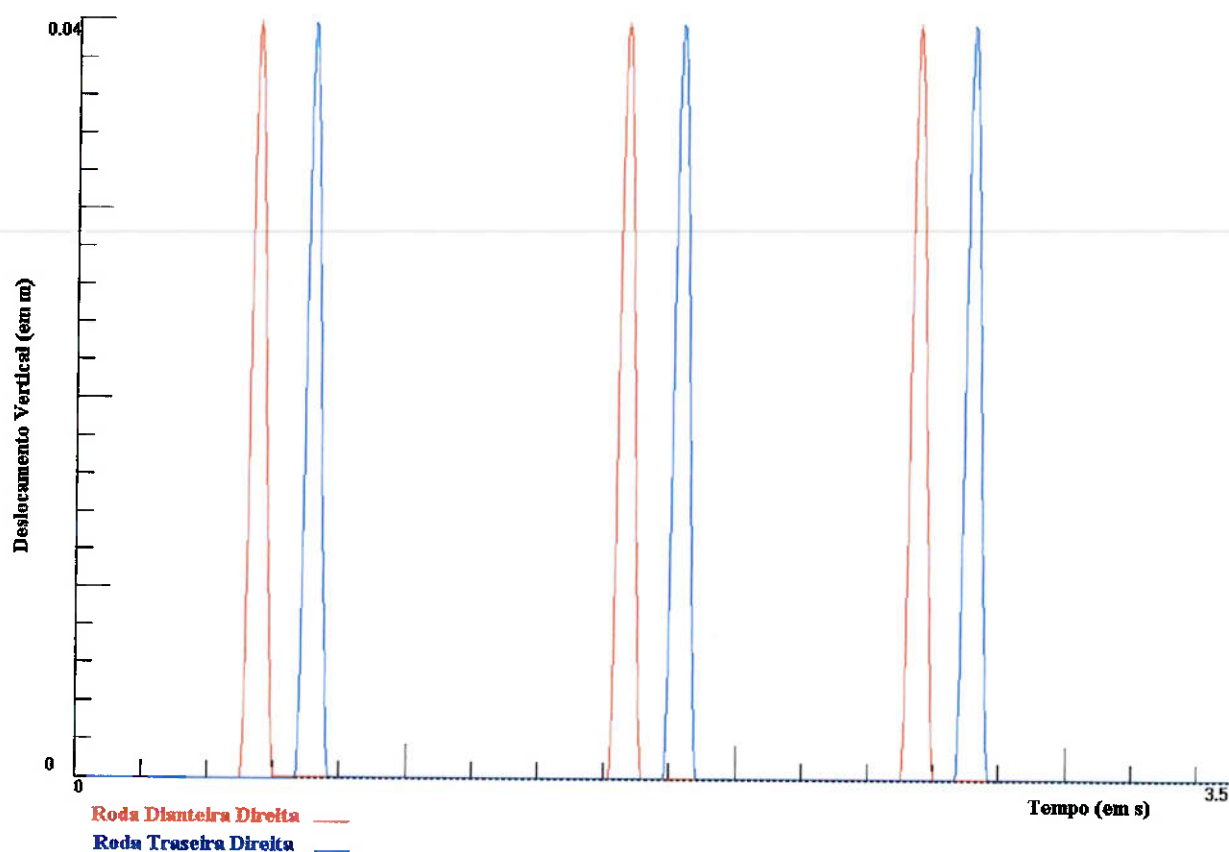


FIGURA 20: DESLOCAMENTO VERTICAL IMPOSTO ÀS RODAS DIREITAS

4.2. Efeito da Gravidade

Devido a uma imposição da integração numérica passo a passo, o efeito da gravidade deve estar associado a uma curva em função do tempo, concomitantemente, sabe-se que a posição inicial não é a de equilíbrio sob a ação da gravidade. Sendo assim, a gravidade foi aplicada segundo uma rampa de 0 a 1 entre os instantes 0s e 0,03s, sendo o valor 0,03s determinado a partir de diversas análises consecutivas, aplicando-se apenas o efeito da gravidade, até que após 0,5s do início da aplicação da gravidade a posição de equilíbrio estático tivesse sido estabelecida. A figura 21 mostra o gráfico obtido para dois pontos de

referência (vide figura 22) na estrutura durante os 0,5s seguintes da aplicação da curva da gravidade, tal como aqui definido.

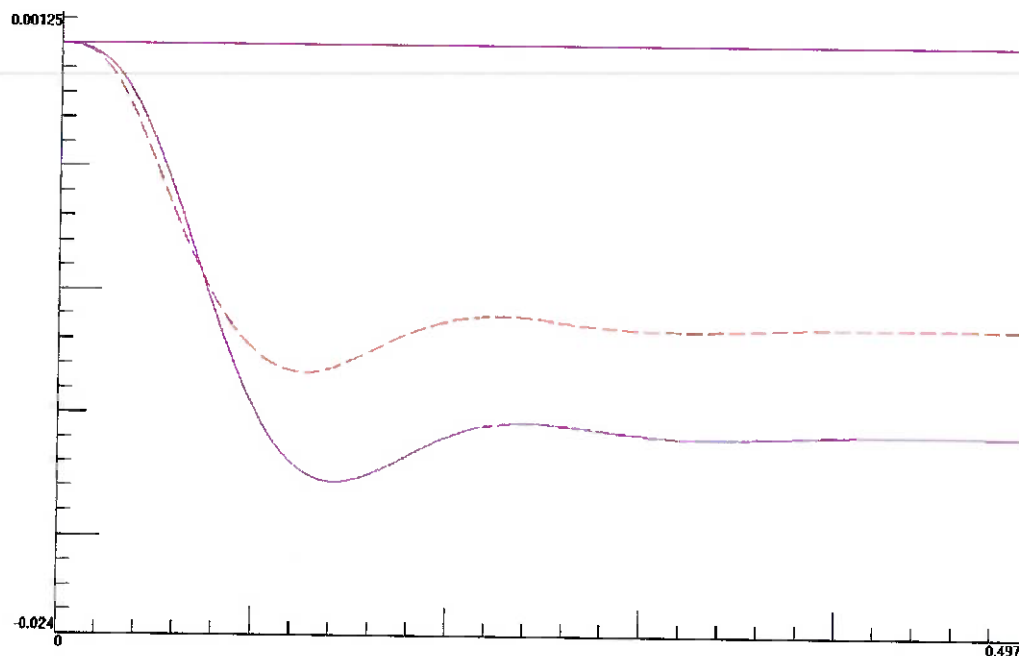


FIGURA 21: ESTABILIZAÇÃO DA ESTRUTURA NA ANÁLISE DINÂMICA APÓS A APLICAÇÃO DA GRAVIDADE

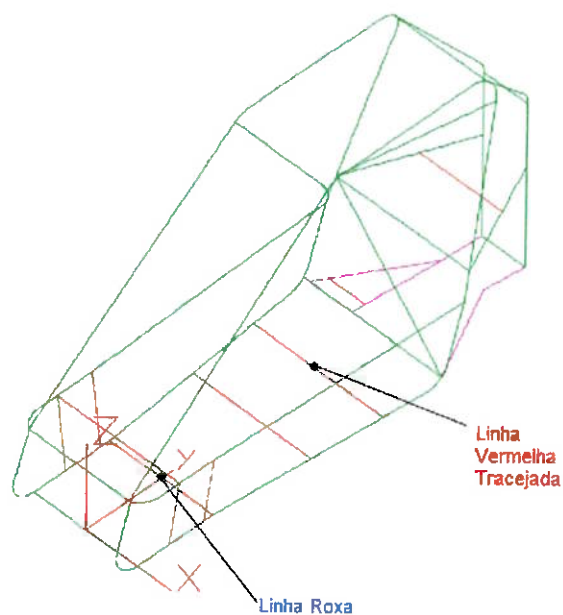


FIGURA 22: PONTOS DE REFERÊNCIA NA ESTRUTURA

4.3. Calibração do Time Step

A escolha do passo de integração no tempo (Time Step) é crucial para a convergência dos resultados de cada iteração e para o tempo de análise (quanto menor o Time Step maior o número de passos a ser calculado). Então, realizando cálculos para apenas a passagem por uma lombada de apenas uma roda, calibrou-se o maior Time Step que garantisse que os resultados convergissem bem, chegando-se ao valor de 0,005s.

Vale ressaltar que nas primeiras análises sequer a primeira iteração convergia o que inclusive gerou dúvidas se a tarefa poderia ser concluída. Contudo, observou-se erro na modelagem inicial do mecanismo da suspensão traseira que possuía graus de liberdade livres em excesso o que impedia a convergência dos resultados. De qualquer forma, esta dificuldade foi superada e o Time Step tido como ideal pode ser definido e, conseqüentemente a simulação dinâmica não linear pode ser consumada.

4.4. Resultados e Análise

Inicialmente, encontra-se apresentado o gráfico com os deslocamentos dos pneus e dos dois pontos de referência definidos na figura 22.

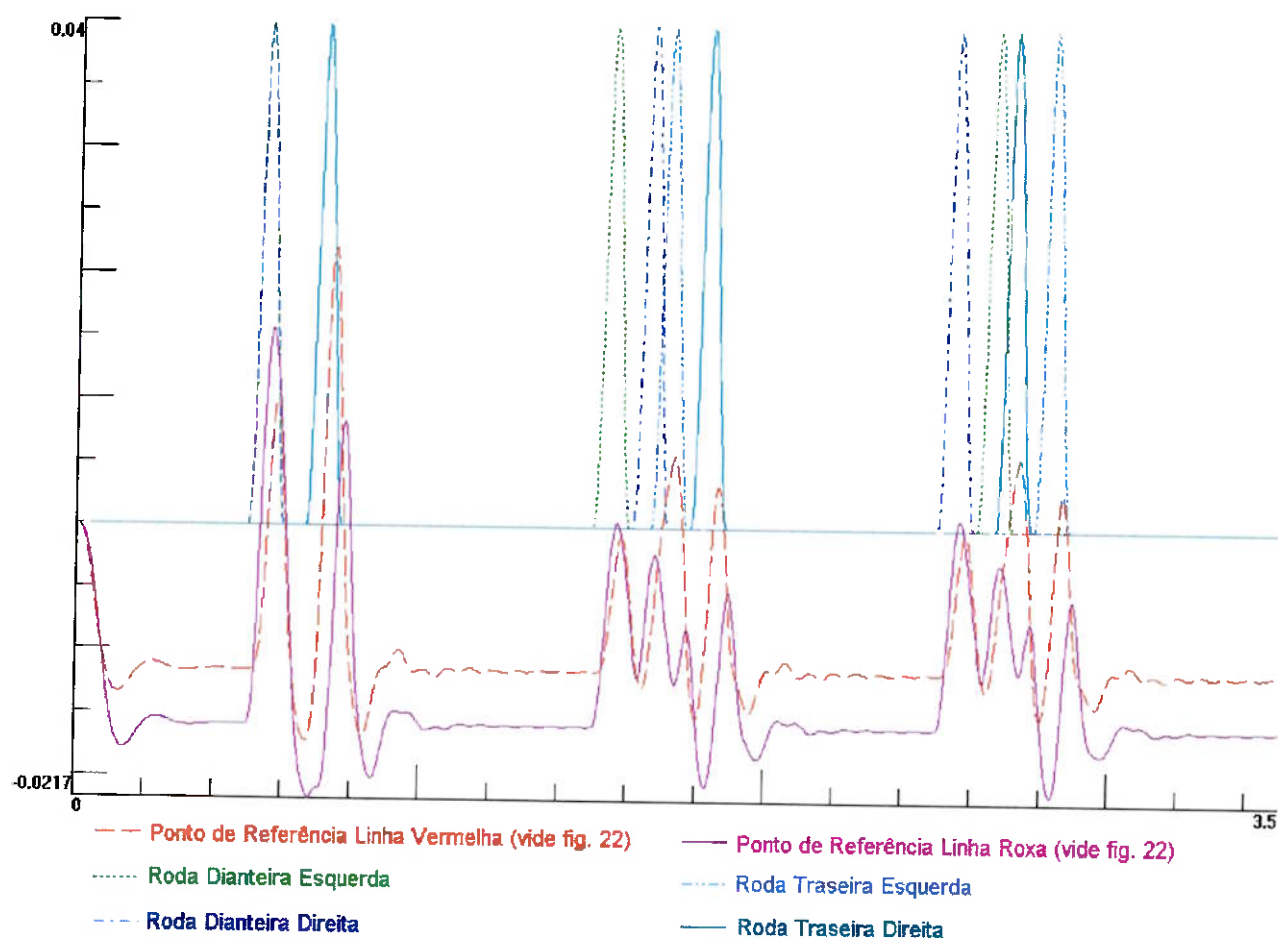


FIGURA 23: DESLOCAMENTO VERTICAL DOS PNEUS E DOS PONTOS DE REFERÊNCIA.

Devido à modelagem adotada, os resultados apresentados da resposta da estrutura contabilizam sua flexibilidade, coisa que normalmente não ocorre em simulações dinâmicas usuais. De qualquer forma, este tipo de análise não pretende substituir as atualmente adotadas, mas, sim, agregar informação auxiliando no dimensionamento dos componentes submetidos a carregamentos dinâmicos.

Com o objetivo de se validar o modelo dinâmico, comparou-se os resultados das análises estática linear e dinâmica não linear sob o efeito apenas

da gravidade. Contudo, como se constata discrepância entre esses resultados (vide figuras 24 e 26), realizou-se, também, uma análise não linear estática (Figura 25), com o mesmo carregamento de corrente da gravidade, com os resultados, agora, coerentes com os obtidos através da análise dinâmica não linear. Conclui-se, portanto, que os grandes deslocamentos decorrentes da abordagem que modela a suspensão para o cálculo implícito dos esforços transmitidos à estrutura exige uma abordagem não linear para que resultados tenham maior representatividade.

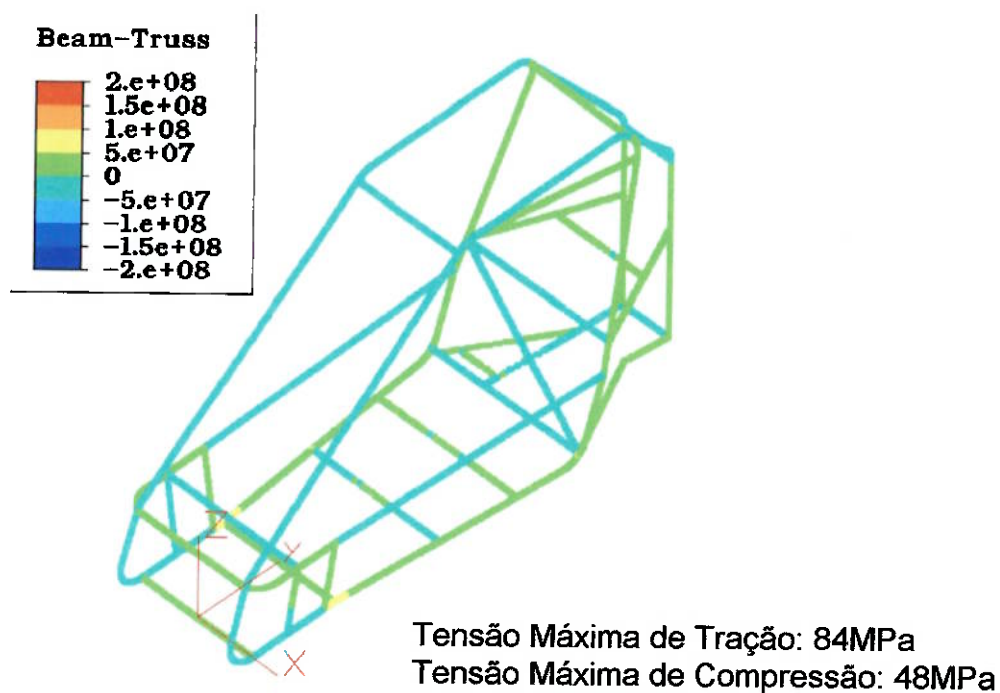


FIGURA 24: ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA SOB EFEITO APENAS DA GRAVIDADE (PA)

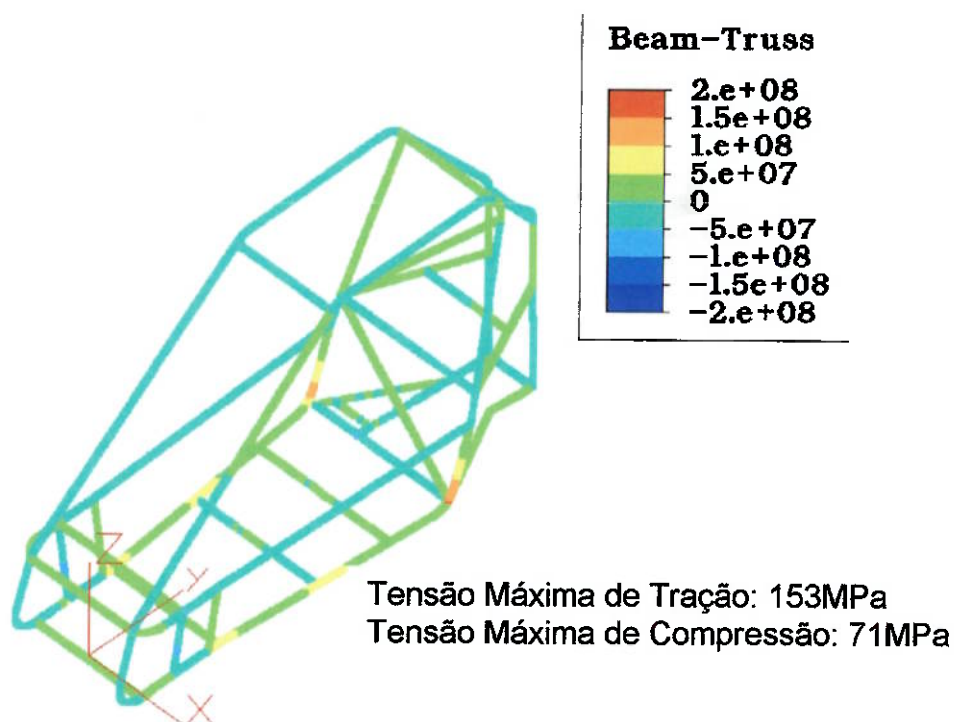


FIGURA 25: ANÁLISE NÃO LINEAR ESTÁTICA SOB EFEITO APENAS DA GRAVIDADE (PA)

Time: 0.5 secs.

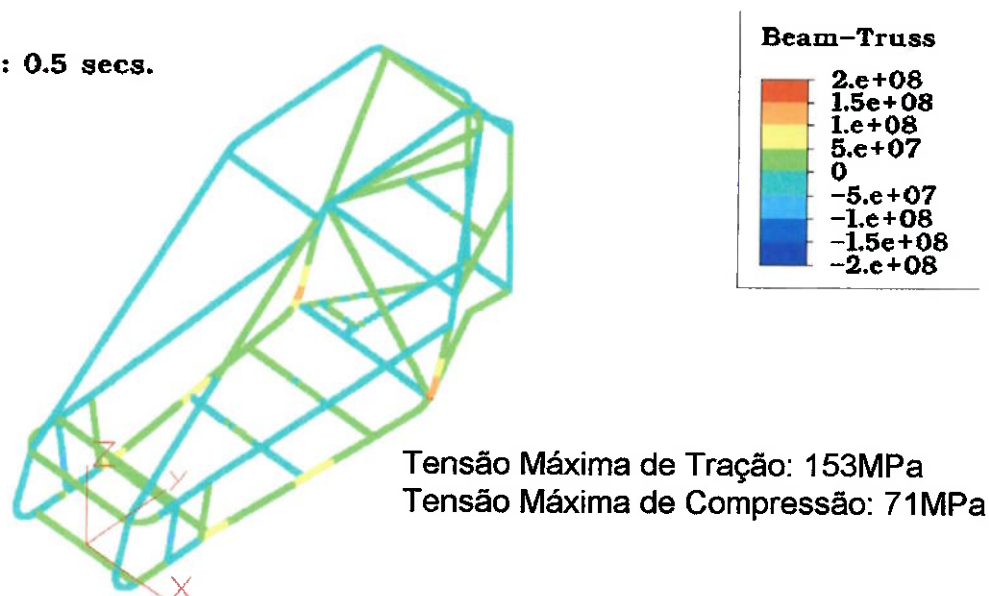


FIGURA 26: ANÁLISE NÃO LINEAR DINÂMICA SOB EFEITO APENAS DA GRAVIDADE (PA)

A melhor forma de mostrar o sucesso na realização da simulação dinâmica de tensões é apresentar a animação oriunda dos resultados obtidos. Por isso, em anexo ao trabalho encontra-se um CD-Rom que possui arquivos de animação do trecho simulado com as tensões variando ao longo do tempo. Os arquivos são:

- Baja.AVI: Animação em tempo real com escala de deslocamento 1:1
- BajaLento.AVI: Animação em câmera lenta (10 vezes mais lenta) com escala de deslocamento 1:1
- BajaD4.AVI: Animação em tempo real com escala de deslocamento 4:1 (ampliando os deslocamentos para melhor visualização do trabalho da suspensão)
- BajaLentoD4.AVI: Animação em câmera lenta (10 vezes mais lenta) com escala de deslocamento 4:1 (ampliando os deslocamentos para melhor visualização do trabalho da suspensão)

Não é o escopo deste trabalho propor um Critério de Projeto que utilize os resultados das análises dinâmicas, mas, apenas, comprovar a viabilidade de tal análise. O desenvolvimento de um critério de projeto a partir de análises dinâmicas é escopo de uma tese de doutorado submetida à aprovação da FAPESP para bolsa, na qual propõe-se um tratamento probabilístico dos carregamentos através da análise de confiabilidade.

4.5. Modelo considerado Ideal

Indiscutivelmente, o modelo dinâmico, aqui analisado, possui algumas limitações que decorrem de simplificações com o intuito de tornar a realização da simulação dinâmica possível num microcomputador. Mesmo que não tenha sido possível implementar na prática o modelo considerado ideal, ele pode ser descrito e, no futuro, tornar-se objeto de estudo de outros estudantes.

A primeira simplificação que salta aos olhos é a elasticidade do pneu. Esta elasticidade implica em duas não linearidades que exigem muito mais recurso computacional: a de grandes deformações do sólido representando a borracha e, conseqüentemente, a de contato entre o solo e o pneu em decorrência das grandes deformações do último. A modelagem da não linearidade de contato tem como aspecto positivo, também, resolver o problema de ser impossível o solo puxar o pneu para baixo, uma outra limitação do modelo atual. A modelagem do contato pneu e solo permitiria a eliminação da hipótese de que o pneu está sempre em contato com o solo.

Também relevantes são as inércias das rodas e do veículo. No modelo aqui analisado as rodas não estão em rotação e tão pouco o veículo possui a energia cinética devido à sua velocidade. Tais informações poderiam ser aplicadas num modelo mais acurado desde que disponíveis os recursos computacionais necessários.

5. Conclusão

As análises propostas foram realizadas com sucesso, entretanto, os resultados aqui apresentados são principalmente qualitativos uma vez que o procedimento ideal exige a realização de ensaios práticos na estrutura do veículo a fim de aferir os resultados obtidos do método dos elementos finitos. De qualquer forma tem-se a confirmação de que possivelmente a estrutura esteja satisfatoriamente dimensionada para resistir à fadiga do material.

A hipótese de se obter os esforços transmitidos do solo à estrutura, modelando-se pneus, rodas e suspensão, implicou em grandes deslocamentos, fenômeno esse que, quando analisado de forma linear, implica em imprecisões no resultado. Conseqüentemente, observou-se diferença significativa entre as análises lineares e não lineares levando à conclusão de que a abordagem aqui proposta depende da realização de análises não lineares para que se obtenham resultados mais representativos.

Apesar do modelo dinâmico estar longe de ser completo, o sucesso nesse tipo de simulação abre as portas para análises que visem não só dimensionar os componentes da estrutura, mas, também, os componentes da suspensão.

6. Referências Bibliográficas

- [1] SAE, regulamento da Competição de Mini-baja, 2000.
- [2] Documentação do Programa ALGOR, 2001.
- [3] Bathe, K. J., "Finite Element Procedures", *Prentice Hall*, 1996;
- [4] Spyrakos, C. C., "Finite Element Modeling in Engineering Practice", *West Virginia University Press*, 1994;
- [5] Alves Fº, A., "Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE", *Érica*, 2000;
- [6] Gillespie, T. D., "Fundamentals of Vehicle Dynamics", *SAE*, 1992.
- [7] Dixon, J. C., "Tires, Suspension and Handling", *SAE*, 1996.
- [8] Barbosa, R.S., & Castro, A., "Safety Vehicle Traffic Speed Limit", *IX International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics*, march 2001;

APÊNDICE A

REQUISITOS MÍNIMOS DE SEGURANÇA

1 GAIOLA DE PROTEÇÃO

- 1.1 O propósito da gaiola de proteção é prevenir que um operador usando cinto de segurança seja esmagado caso o veículo capote. O projeto da gaiola será julgado considerando-se este fato.
- 1.2 Todos os veículos devem ser equipados com uma gaiola de proteção que tenha no mínimo quatro (4) pontos distintos sobre a cabeça do piloto, e que seja presa na estrutura principal do veículo no mínimo em quatro (4) pontos. Além disso, a gaiola de proteção deve ser fixa na dianteira, traseira e laterais e deve proporcionar rigidez lateral obtida através de barras laterais, barras diagonais ou uma combinação das duas. Veja figuras S9, S10 e S11.

Para um certo espaço livre para a cabeça do piloto, a gaiola de proteção deve estar a uma distância mínima de 1042mm (41") acima da superfície do assento até a parte mais baixa dos tubos superiores da gaiola (baseado nas tabelas da norma SAE J833a), medidos verticalmente usando o gabarito da figura S1. Entretanto, se pilotos mais altos estiverem presentes, a gaiola deve ser construída de modo que a folga mínima entre a parte superior do capacete e a parte mais baixa dos tubos superiores da gaiola de proteção seja maior que 76mm (3").

- 1.3. A gaiola de proteção deve ser construída em tubos de aço com o mínimo de 0,18% de carbono. Os tubos devem ter um diâmetro mínimo de 25,4mm (1") e uma espessura de parede mínima de 2,1mm (0,083"). A variação dos materiais e da geometria dos tubos será permitida desde que apresentem um EI equivalente, onde E = módulo de elasticidade e I = momento de inércia sobre o eixo mais fraco. Dois furos de Dia 4.5mm poderão ser feitos pelos juizes. O EI equivalente é o mais importante indicador para comparar materiais equivalentes das gaiolas de proteção. Somente ensaio de tração não é um bom critério para ser usado. Será dada ênfase ao módulo da seção para cada tubo.

Todas as propriedades dos materiais devem ser medidas considerando-se a solda. Se a gaiola sofrer tratamento térmico para aumentar sua resistência, estas propriedades podem ser usadas para o projeto somente se uma documentação adequada do processo e prova de que o processo foi realmente aplicado a gaiola em questão forem fornecidas para julgamento. (Relatório de Segurança)

Todas as equipes devem apresentar uma cópia da folha de especificação da Gaiola de Proteção (anexa) ao organizador até a data especificada. A especificação completa deve ser apresentada, sem o que a equipe não poderá competir.

- 1.4. A gaiola de proteção deve ser protegida com material resiliente nas áreas ao redor da cabeça do piloto. Materiais recomendados são "Ethafom" ou "Ensolute". Além disso, um descanso de

cabeça de no mínimo 25,4mm de espessura feito também com material resiliente deve ser montado atrás da cabeça do piloto.

- 1.5 Todas as rebarbas e pontas que representem perigo para o piloto, membros da equipe, oficiais e juizes devem ser eliminadas por arredondamento e/ou protegidas. Isto inclui barras, chavetas, parafusos, grampos, braçadeiras, ou outros componentes acessíveis durante a manutenção, julgamento ou impacto / capotamento durante a competição.

2. SEGURANÇA DO PILOTO

- 2.1. É obrigatório um sistema que mantenha o piloto na posição de dirigir de pelo menos quatro cadarços sendo 2 formando um conjunto sub-abdominal e dois sobre os ombros. Cada cadarço que passa sobre os ombros deve ser fixado ao chassi com seu próprio parafuso. Modelos de cintos em “Y” onde um simples cadarço se divide sobre os ombros não são permitidos. Todos os cadarços devem se unir numa única fivela, de liberação rápida com contatos / encaixes de metal. Todos os cintos devem estar conforme especificação 16.1 da SFI, ou equivalente e devem estar em boas condições. As áreas nas quais os cadarços passam devem ser protegidas para evitar desfiamento.

- 2.2. Os pontos de fixação do cinto devem ser feitos de acordo com uma boa prática de engenharia. Todas as fixações devem ser feitas no chassi e não no assento.

- 2.3. o cinto deve ser ajustado de tal maneira que passe envolta da área pélvica num ponto abaixo da parte anterior superior da bacia. Sob nenhuma circunstância o cinto pode ficar sobre a área dos intestinos e abdômen. Os pontos de fixação do cinto devem ser projetados de acordo com a figura S2. Os cadarços dos ombros não poderão ser fixados acima do nível dos mesmos nem após a parede de fogo.

Quando ajustado, nenhuma parte do cinto deve se projetar além da área do habitáculo e não poderá vir a ter contato com as partes móveis do chassi do veículo ou com as irregularidades do terreno. As extremidades do cinto que sobram após o ajuste ao piloto devem ser presas mas não enroladas a fivela de maneira a prevenir seu mau funcionamento.

- 2.4. No caso de capotagem, os braços do piloto devem se manter dentro dos limites da gaiola de proteção. Isto pode ser conseguido com limitadores dos movimentos dos braços, ou com telas nas laterais. Estes itens devem estar seguramente presos no veículo ou no sistema do cinto de segurança.

Todas as instalações devem evitar que se soltem com uma puxada direta, capotagem, ou deslizamento lateral. Os limitadores dos movimentos dos braços devem ser instalados de maneira que permitam ao piloto sair do veículo sem ajuda externa, independente da posição do veículo.

3. HABITÁCULO

- 3.1. O habitáculo deve ser projetado para facilitar a saída do piloto numa emergência.
- 3.2. O projeto do chassi deve possuir proteção contra impactos laterais na área do habitáculo. Isto se consiste de uma estrutura contínua, que se estenda numa altura mínima de 200mm acima da parte mais baixa do assento em contato com o piloto, ao longo de todo o comprimento do habitáculo. Todas as extremidades pontiagudas e salientes devem ser eliminadas. O objetivo desta estrutura é proteger o piloto no caso de uma colisão.
- 3.3. É obrigatório a instalação de uma parede de fogo entre o habitáculo e o compartimento do motor e tanque de combustível. A parede de fogo deve ser de metal, com uma espessura mínima de 0,5mm e deve separar completamente o habitáculo.

Recortes para a corda de partida serão permitidos somente se sua construção mantiver a separação do habitáculo.

Além disso, o habitáculo deverá ter um assoalho de proteção ao longo de todo o seu comprimento, não permitindo que haja algum tipo de contato do piloto com o solo enquanto estiver sentado na posição de pilotagem. Metais expandidos **não** são aceitáveis como placas de proteção.

- 3.4. Cada veículo deve estar equipado com dois interruptores que desliguem efetivamente a ignição e todo o sistema elétrico do carro. Estas chaves deverão também desligar uma bomba de combustível elétrica auxiliar se instalada. Uma das chaves, deve estar localizada no lado direito do veículo, na altura do ombro do piloto, num dos tubos da gaiola de proteção com fácil acesso ao pessoal de apoio da pista. A outra chave deve estar localizada a mão do piloto quando dirigindo usando todos os dispositivos e equipamentos de segurança. Os dois interruptores devem ter a indicação de “Chave Geral” e “ligado” e “desligado”.

Veículos com o cubo do volante removível não poderão montar esta chave no volante.

- 3.5. Um extintor de incêndio do tipo automotivo com pelo menos 1Kg deve ser colocado no habitáculo num lugar de fácil acesso para o piloto. A montagem deve suportar trepidações, para evitar a perda ou soltura do extintor, ainda assim permitindo fácil utilização. Devem portar manômetros instalados pelos fabricantes e devem estar legíveis para inspeção.

Sistemas remotos contendo no mínimo 2,3Kg de HALON 1211 ou MALON 1301 são permitidos.

- 3.6. Todas as ligações ou conexões do sistema de direção e da suspensão expostas no habitáculo devem ser protegidas para evitar contato com as pernas do piloto evitando também prenda-las.

3.7. Serão permitidos acelerador e freios acionados somente pelos pés. Outros comandos poderão também ser acionados pelos pés mas freio e acelerador não poderão ser acionados senão pelos pés. O pedal de acelerador deve ter um batente na posição de máximo acionamento. Os pedais devem ser posicionados e dimensionados de maneira a evitar que os pés do piloto possam ficar presos de alguma forma, independente da sua posição.

Qualquer tipo, (mecânico, hidráulico, etc.) de controle de aceleração deve ser projetado para retornar a posição de marcha lenta qualquer que seja a falha experimentada pelo sistema.

3.8. O tempo máximo para o piloto sair do veículo é de 5 segundos. A equipe deve estar preparada para demonstrar isto com os maiores pilotos.

4. SISTEMA DE FREIOS

4.1. Todos os veículos devem incorporar um sistema de freios capaz de atuar pelo menos nas rodas dianteiras ou traseiras, e seja também capaz de travar estas rodas em pavimento seco. Este sistema de freios deve ter a capacidade de parar o veículo a 40Km/h numa distância de 12m ou no máximo 15m para qualquer velocidade superior a 40Km/h medida por qualquer processo, a critério do organizador.

4.2. **O veículo deve estar equipado com uma luz indicadora de FREIO de pelo menos 15watts. claramente visível quando observado pela traseira.**

4.2. Freios nas rodas motrizes devem operar através do eixo da roda. Freios centrais atuando através de juntas universais são permitidos. Freios no eixo comando de válvulas ou através de uma redução intermediária sem freios nas rodas não motrizes (sem freio nas 4 rodas) são proibidos.

5. SISTEMA DE COMBUSTÍVEL

5.1. Todo o sistema de combustível deve estar envolvido pela gaiola de proteção para que esteja protegido contra impactos. As fixações do tanque devem ser projetadas para que resistam a vazamentos durante o movimento do veículo.

5.2 O tanque deve ser construído de modo que nenhum combustível possa derramar ou vazar no piloto, motor, ignição ou escape. Os tanques não podem ser montados dentro do habitáculo.

5.3. Todas as tampas de enchimento do tanque de combustível devem ser cativas. Por “cativa” entende-se mecanicamente impedida de afrouxar prevenindo vazamentos de combustível. Dois métodos recomendados estão ilustrados na figura S3. Tampas do tipo “MONZA”, tampas de abertura rápida não são permitidas. Todas as tampas devem prevenir vazamento quando o veículo estiver na posição capotado. **As tampas Brigge & Sttraton não atendem este ultimo requisito.**

5.4. Somente 1 tanque é permitido. Os tanques de combustível são restritos ao modelo de fábrica P/N 392214, fornecido pela Briggs & Stratton.

5.5. O tanque de combustível deve possuir um respiro, de tal modo a prevenir vazamentos de combustível em caso de capotamento. O tubo do respiro deve ser direcionado acima da montagem do tanque e então estendida para um ponto mais baixo que o tanque prevenindo vazamentos de combustível na capotagem. Esta montagem acima descrita é necessária independentemente do uso de uma válvula de retenção no respiro.

5.6 Todos os condutos de combustível devem estar longe de extremidades pontiagudas e devem ser protegidas. Guias e reforços são necessários quando os condutos de combustível passarem através de qualquer componente do veículo. Os condutos de combustível não podem passar no habitáculo. Todos os condutos de combustível devem estar firmemente presos e não devem ser maiores que o original (1/2" externo e 1/4" interno).

6. COMBUSTÍVEL

6.1. O único combustível permitido é uma graduação de gasolina automotiva contendo hidrocarbonetos, antioxidantes, desativadores de metais, inibidores de corrosão e álcool. A adição de produtos nitrogenados ou destinados a liberar oxigênio é estritamente proibida. O peso específico não deve exceder a 0,80 quando medido a 15^o Celsius. Todos os combustíveis devem ser transportados em recipientes aprovados pelas normas DOT.

7. DIREÇÃO E SUSPENSÃO

7.1 Todos os veículos devem ser equipados com batente positivo nas rodas.

7.2. Braços e elementos da suspensão dianteira devem estar protegidos de impactos frontais. Um parachoques pode ser necessário, no entendimento do vistoriador técnico, dependendo do projeto e instalação.

7.3 Todos os veículos que usarem articulações esféricas simples nas conexões dos varões e braços da suspensão, devem acrescentar na montagem uma arruela de segurança com diâmetro suficiente para prevenir a separação das peças no caso da falha da articulação. Conexões duplas como mostrado na figura S4 são recomendáveis.

8. ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

8.1. Todos os elementos da fixação dos sistemas de suspensão, direção, freio e cinto de segurança devem ser travados; isto é necessitam porcas auto-frenantes, porcas castelo, parafusos para trava com arame (para aplicações sem porcas). Arruelas de pressão e travas químicas **não** atendem este requisito. Figura S5

8.2. Todos os parafusos usados nos sistemas mencionados no item 8.1 devem ser do tipo SAE grau 5, ou ISO 8.8 ; Ver figura S6. Qualquer elemento da fixação não mostrado na figura S6 deve ter documentação provando sua aplicabilidade.

9 PROTETORES

9.1. Todos os componentes moveis do trem de força, como correias, correntes, ou rodas dentadas devem ter protetores adequados para que o piloto ou pessoas próximas não se machuquem caso um componente se quebre enquanto o veículo estiver em movimento. Estes protetores devem se estender por toda a periferia dos componentes alinhados com o piloto, pessoas próximas, tanque e condutas de combustível, e devem impedir o acesso dos dedos nas partes moveis. Figura S7.

O material destes protetores devem ser de aço 1010 com espessura mínima de 1.5mm ou material de resistência equivalente. Juntas universais, eixos, cubos e discos de freio não necessitam de proteção.

9.2 Hélices se usadas devem estar localizadas ou protegidas da maneira que não seja possível o contato direto com elas.

0 BANDEIRA

Uma bandeira de cor laranja deve ser montada em uma haste e colocada a uma altura entre 2,2m e 2,5m do solo. A extremidade superior deve ser cega para evitar ferimento. Recomenda-se a instalação de uma esfera de 50mm de diâmetro. Uma flâmula ou bandeira da escola pode ser adicionada devendo porem estar abaixo da bandeira laranja de sinalização.

1 INFORMAÇÕES GERAIS

11.1 Toda instalação ou construção está sujeita a aprovação dos vistoriadores que podem requerer modificações, se julgarem que tal item compromete a segurança.

11.2 Para ajudar os oficiais de segurança e para dar a todas as equipes a oportunidade de ter seu projeto submetido a uma revisão preliminar, os organizadores podem requerer a todos os participantes o envio de desenhos com qualidade profissional, para as oficiais de segurança até a data prevista através de boletim informativo. Estes desenhos deverão mostrar todos os itens de segurança pedidos, além de estarem bem detalhados para permitir tal revisão.

11.3 No final da prova de resistência, os 6 primeiros veículos colocados serão isolados e vistoriados quanto a rotação máxima do motor e em quais quer modificações, incluindo a desmontagem do motor. Esta inspeção poderá ser estendida a qualquer dos veículos participantes, a critério da organização.

2 REQUISITOS PARA O PILOTO

- 12.1 Todos os pilotos devem usar um capacete se ajuste bem no piloto normalizados com “M-85”, SA-85, M-90 ou selo do INMETRO para capacetes fabricados no Brasil. Visores ou óculos de material transparente e resistente a impactos também deverão ser usados.
- 12.2 Os pilotos devem vestir roupas apropriadas incluindo calças compridas e mangas compridas de um material que não seja facilmente inflamável tal como nylon e outos.
- 12.3 Cintos de segurança, capacetes, proteção para os olhos e vestimenta adequada deverão ser usados todas as vezes que o piloto operar o veículo.
- 12.4 Evidência de consumo de bebidas alcoólicas ou de substâncias controladas em qualquer momento do evento, implica na desclassificação imediata da equipe a qual o piloto pertencer, sem direito a reclamação.

Figura S1

Gaiola de Proteção

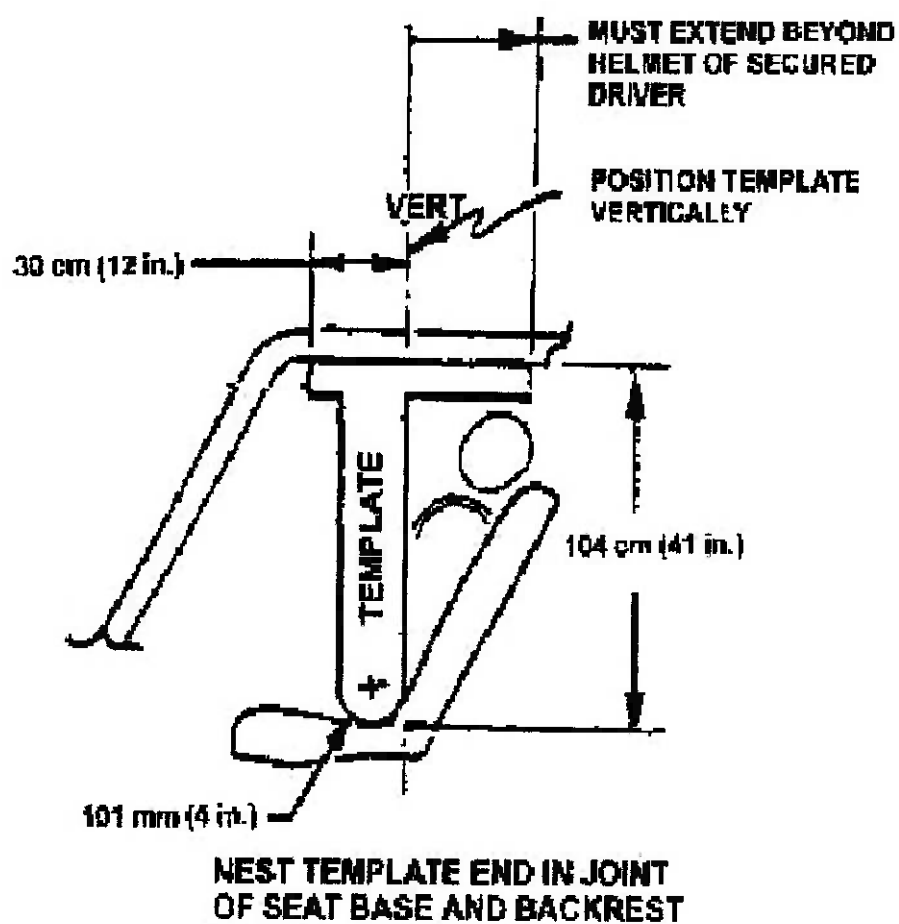


Figura S2
Pontos de Fixação do Cinto da Segurança

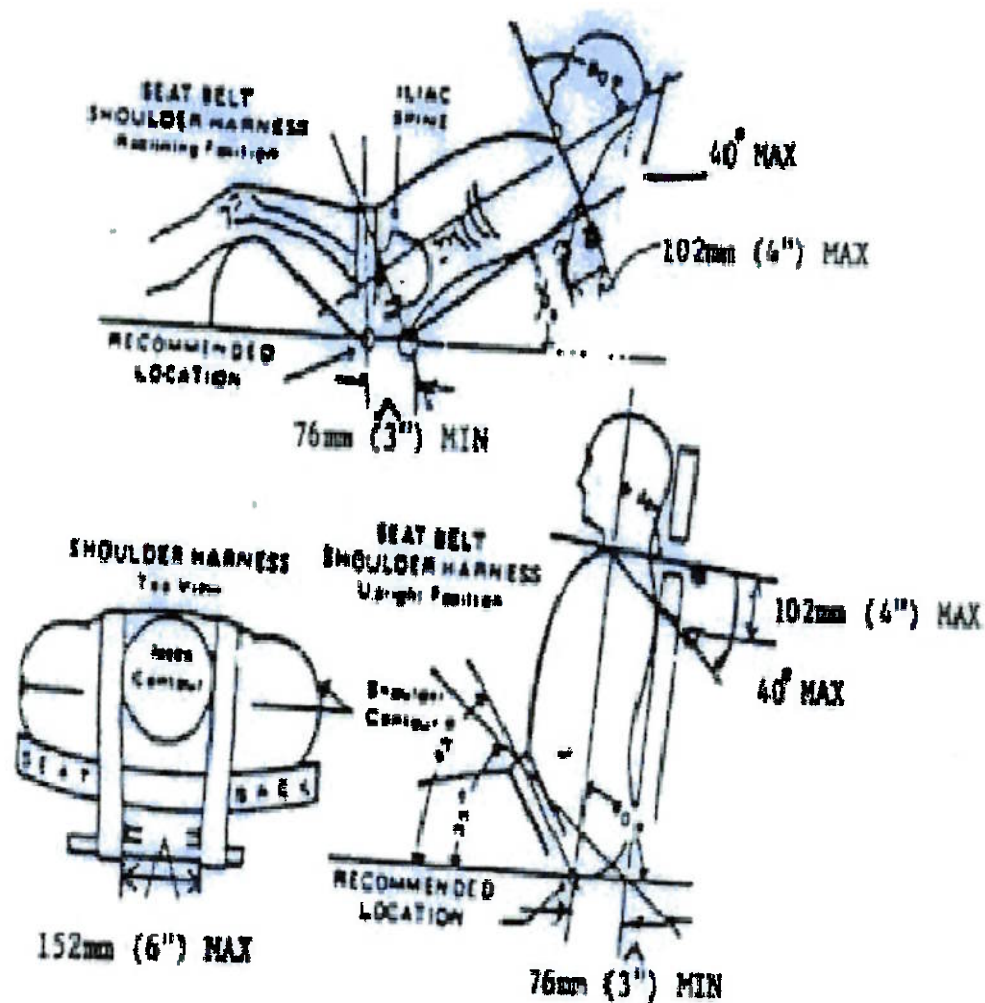


Figura S3
Tampas Cativas

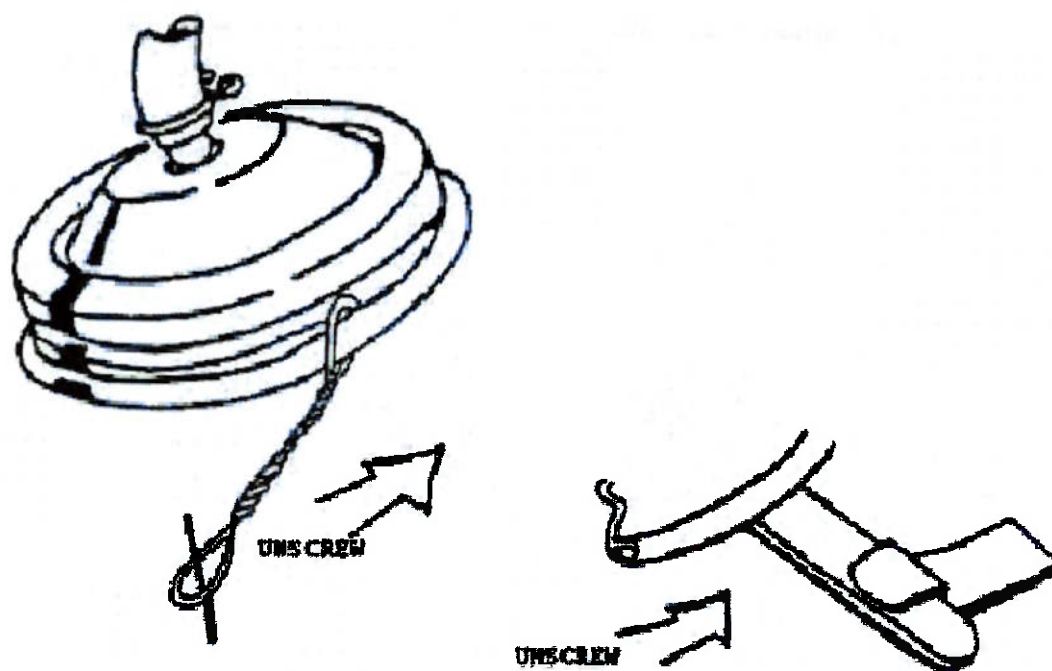


Figura S4
Proteção para terminais esféricos

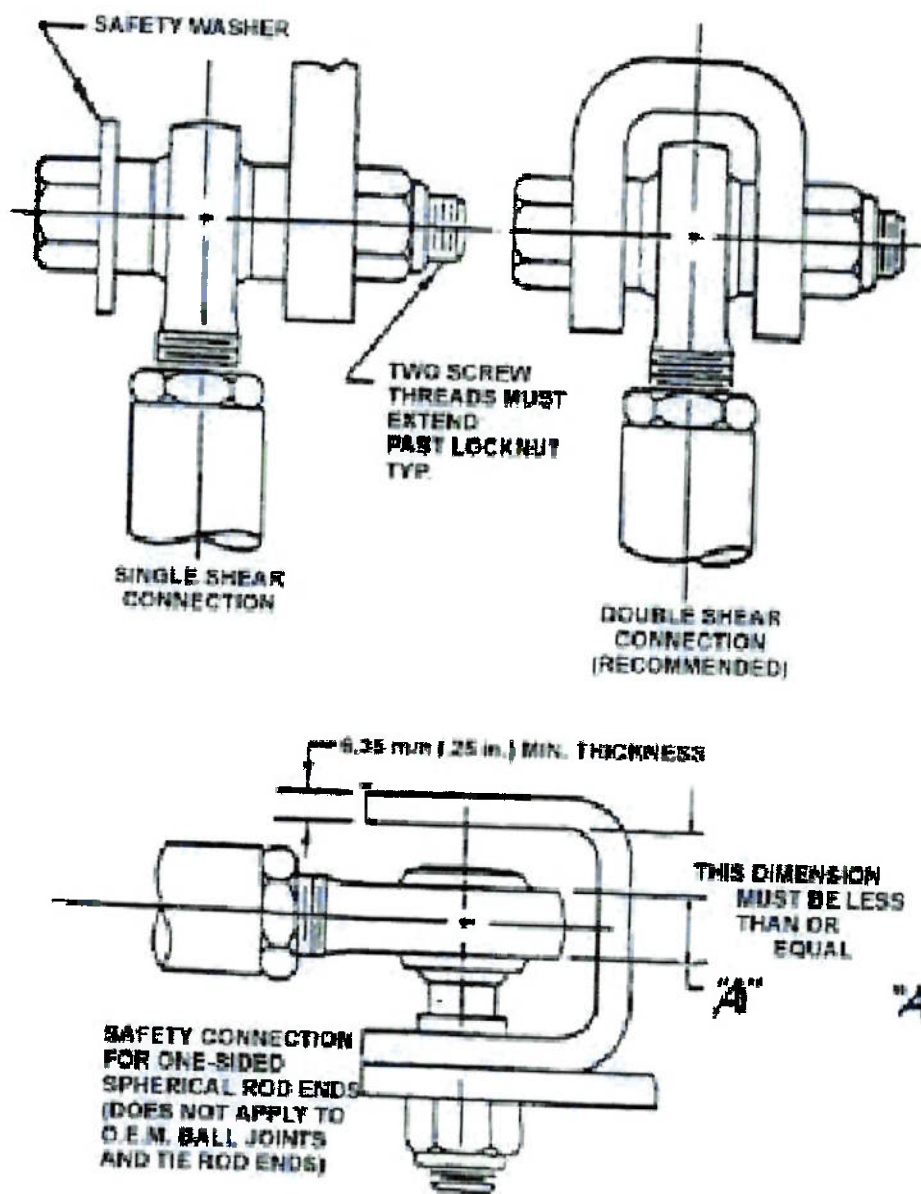
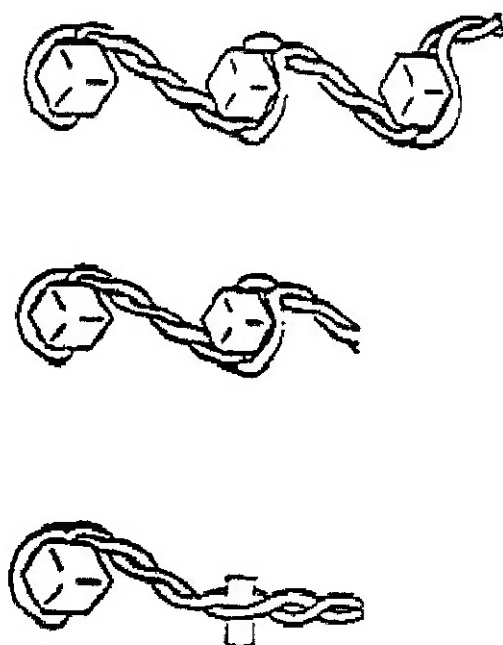


Figura S5
Trava com Arame - Detalhe



- As ilustrações acima supõem rosca direita.
- Não mais do que três parafusos podem ser travados juntos
- Cabeças de parafusos podem ser travadas assim somente quando montado a roscas cativas ou em porcas travadas.
- Porcas também podem ser travadas desta maneira desde que sejam tratadas e tenham sido fabricadas para serem travadas com arame.
- O arame de trava deve preencher pelo menos 75% do devido furo.
- O arame de trava deve ser recosido de baixo teor de carbono e recozido com 0,5 mm de Dia, 0,8 mm de Dia ou 1,07mm de Dia determinado pelo tamanho da rosca como segue:
 1. Roscas até 1/4", usar arame de 0,5mm.
 2. Roscas de 1/4" até 1/2", usar arame de 0,8mm.
 3. Roscas maiores que 1/2" usar arame de 1,07mm.
 4. Se necessário os arames maiores podem ser usados nos componentes menores mas arame menores não podem ser usados em componentes grandes.

Figura S6
Identificação do Grau SAE de Parafusos

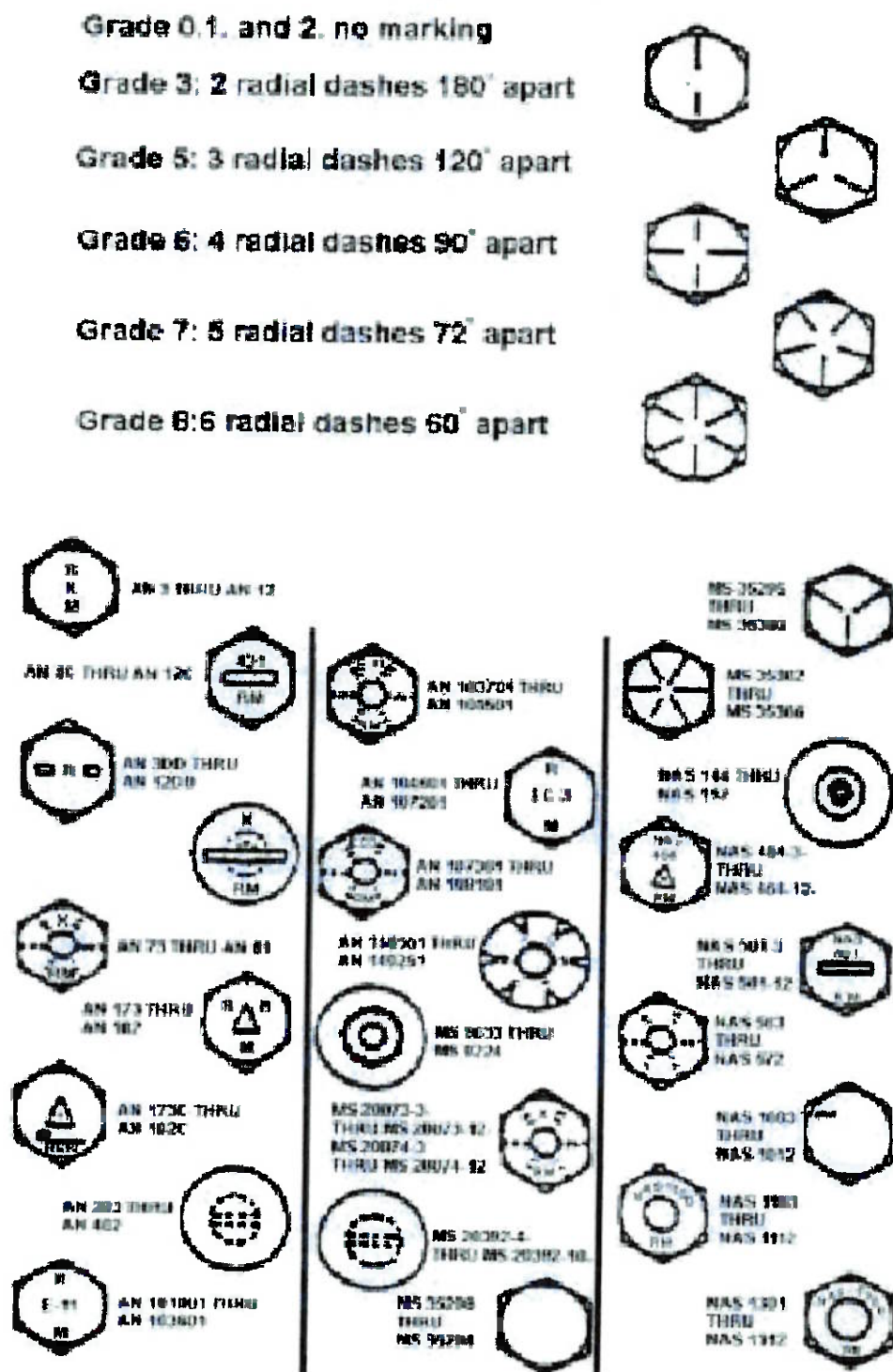


Figura S7

Proteções

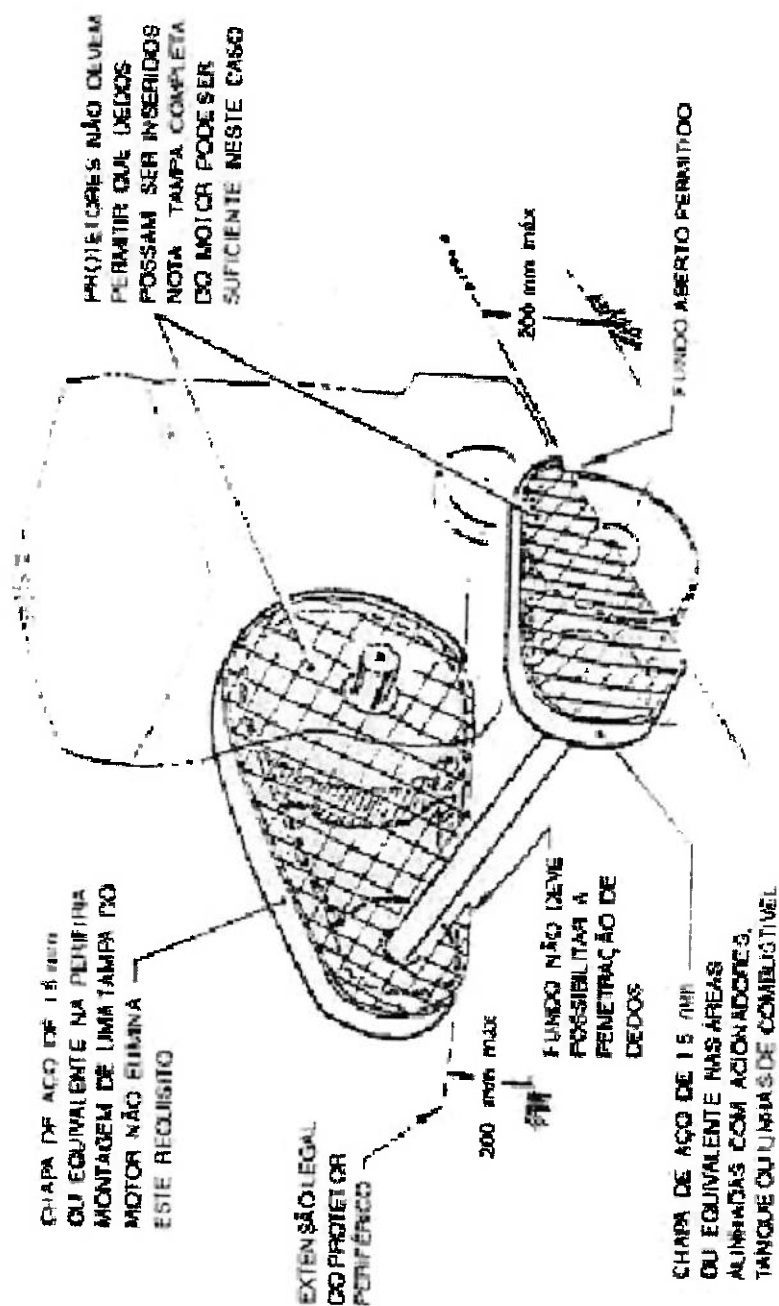


Figura S8

Exemplo de um Veículo Mini Baja®

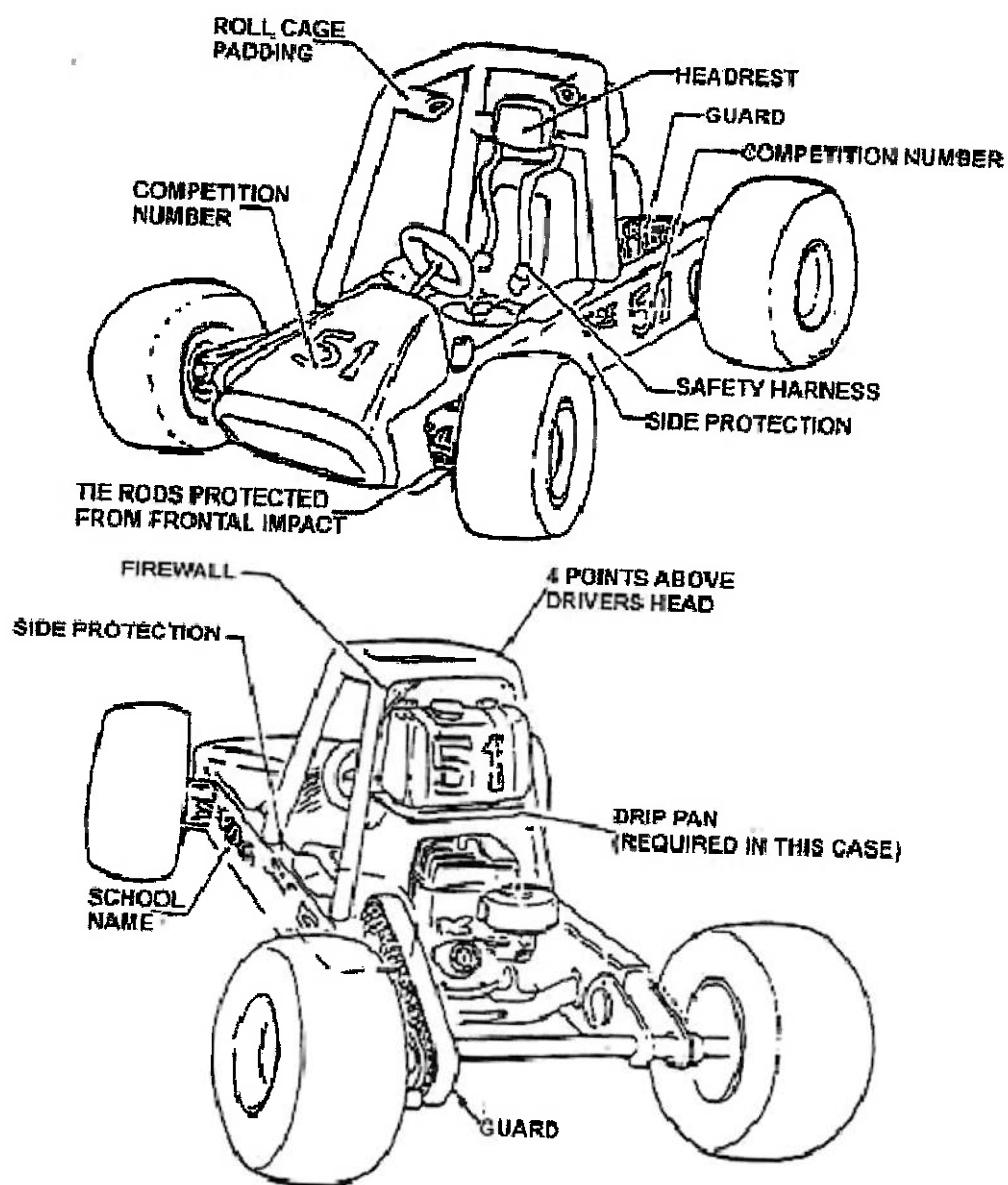
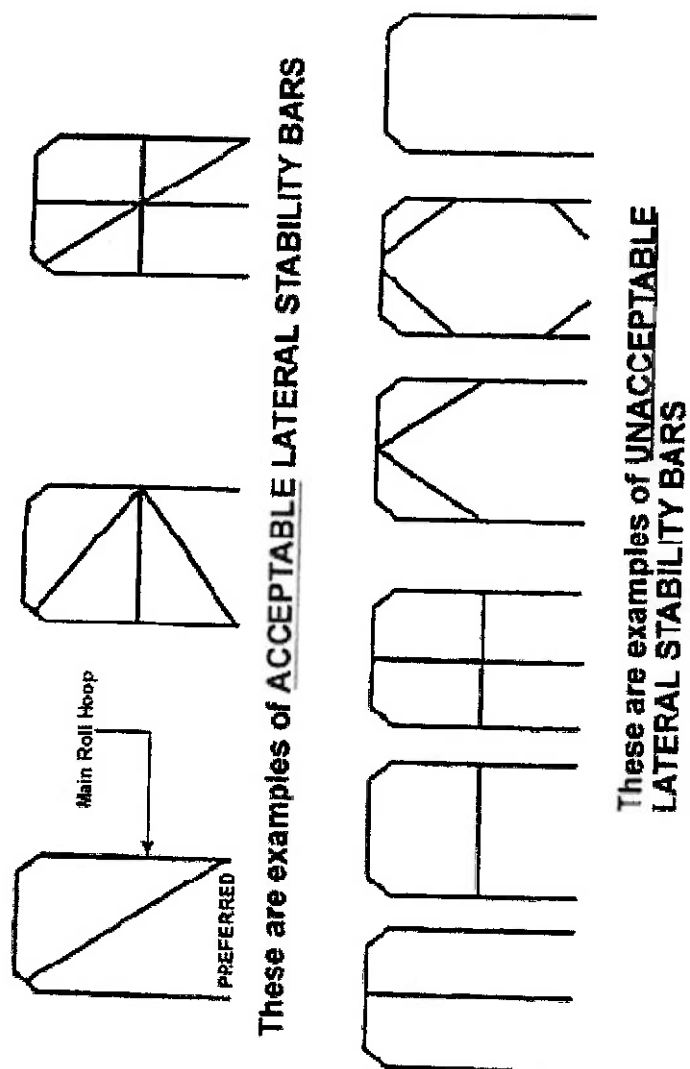
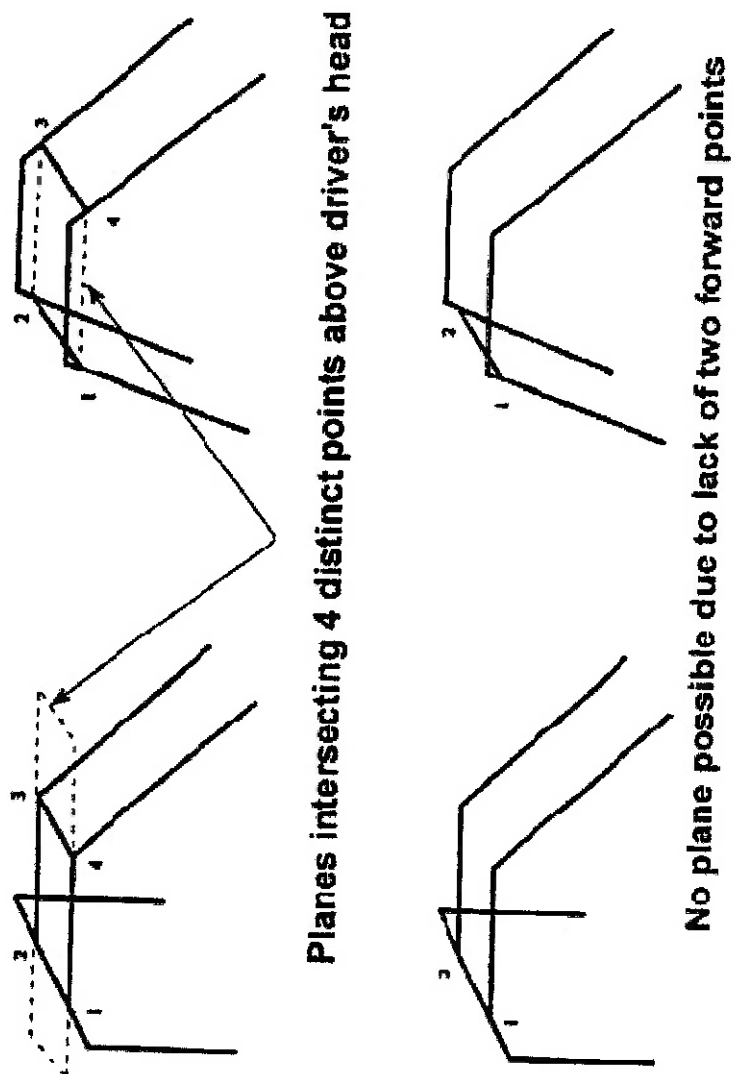


Figura S9 - Barras de Estabilidade Lateral



Seu carro tem que atender o critério mostrado acima para poder competir no Mini Baja®

Figura S10



Seu carro tem que atender o critério mostrado acima para poder competir no Mini Baja®

Figura S11
Suporte Traseiro da Gaiola de Proteção

