

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Vista
Posterior
M. 1/10⁵

PROJETO DO CHASSIS DE UM KART

Rodrigo de Andrade Caldas e Sousa

São Paulo
2005

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO DO CHASSIS DE UM KART

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de
Graduação em Engenharia.

Rodrigo de Andrade Caldas e Sousa

Orientador:
Prof. Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2005

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luis e Gláucia, ao meu irmão, André, à minha namorada, Fernanda, e à toda minha família pelo amor, carinho e apoio que sempre me proporcionaram.

Ao amigo Marcelo Tanaka Hayashi pela ajuda durante todo o curso e pelo empenho no desenvolvimento deste projeto.

Aos amigos Alex Osoegawa, Felipe Garcia, Elcio Lora, Fábio Mazza, Fábio Nunes, Rafael Buff, Marco Ceze, Giovani Amianti, além de tantos outros, que tornaram os anos de graduação inesquecíveis.

Ao Marcelo Petriccione e todos os funcionários da empresa Birel Sudam pelo esforço e atenção durante a realização deste trabalho.

Aos professores Marcelo Augusto Leal Alves e Marcelo Massarani pelos esclarecimentos em momentos críticos do projeto.

Ao Prof. Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni pela orientação, atenção e incentivo durante todo este trabalho de formatura.

RESUMO

O presente trabalho se refere ao projeto de chassis de um kart de competição, junto à empresa Birel Sudam, desde o estudo de viabilidade técnico econômico até a produção. O projeto foi dividido entre o desenvolvimento do chassis e o desenvolvimento dos subsistemas do kart, com exceção do motor e dos pneus, e visa a homologação da Confederação Brasileira de Automobilismo válida para o período de 2006 a 2008. O desenvolvimento do chassis inclui a seleção de materiais e alternativas, para que, depois de uma análise por softwares de elementos finitos, seja definido o projeto final do chassis. Como em toda competição, o objetivo principal do produto é o melhor desempenho possível.

ABSTRACT

This work refers to a competition go-kart chassis project, together with the firm Birel Sudam, and it covers from the study of the technical-economical practicability, till the production. The project was separated into chassis development and the go-kart subsystems development, exception made to the engine and tires, and it aims the legal ratification of the Confederação Brasileira de Automobilismo (CBA), valid for the period of 2006 to 2008. The chassis development includes the material selection and alternatives, so that, after a finite element analysis using softwares, the chassis final project is defined. As in all competitions, the main purpose of the product is to achieve the best performance possible.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	ESTUDO DE VIABILIDADE.....	2
2.1.	Estabelecimento da necessidade.....	2
2.2.	Especificação técnica da necessidade.....	2
2.2.1.	Requisitos construtivos.....	2
2.2.1.1.	Do regulamento técnico (CBA).....	2
2.2.1.2.	Do fabricante.....	5
2.2.2.	Requisitos operacionais.....	5
2.2.3.	Requisitos funcionais.....	5
2.3.	Estruturação do desenvolvimento de alternativas.....	6
2.4.	Viabilidade técnica.....	6
2.5.	Viabilidade econômica.....	7
3.	PROJETO BÁSICO.....	8
3.1.	Seleção de materiais.....	8
3.2.	Alternativas de estruturas.....	13
4.	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....	24
4.1.	Modelo.....	24
4.2.	Solução.....	27
5.	RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	38
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Barra suplementar.....	4
Figura 2.2 – Limites da carenagem.....	4
Figura 3.1 – Facilidade de soldagem do aço, em relação ao seu teor de carbono... ..	10
Figura 3.2 – Desenho Básico.....	13
Figura 3.3 – Evolução do desenho para permitir movimentação das rodas dianteiras	14
Figura 3.4 – Estrutura com a longarina para fixação do motor.....	14
Figura 3.5 – Estrutura modificada para utilização de pára-choque traseiro removível.....	15
Figura 3.6 – Modelo aproximado para o cálculo do deslocamento da extremidade da estrutura.....	16
Figura 3.7 – Tipo de estrutura a ser utilizado.....	18
Figura 3.8 – Alternativas de estruturas.....	19
Figura 3.9 – Chassis selecionado.....	21
Figura 3.10 – Vista lateral do chassis.....	22
Figura 3.11 – Vista superior do chassis	22
Figura 3.12 – Perspectiva isométrica renderizada do chassis	23
Figura 4.1 – Gráfico de aceleração lateral, posição do volante, velocidade e rotação do motor em função do espaço.....	24
Figura 4.2 – Simulação de carregamentos aplicados ao chassis pelo corpo do Piloto.....	25
Figura 4.3 – Modelo de elementos de vigas do chassis.....	27
Figura 4.4 – Deformações no chassis após a aplicação dos carregamentos.....	28
Figura 4.5 – Vetores de deslocamento de todos os nós da estrutura.....	29
Figura 4.6 – Distribuição de tensões no chassis.....	30
Figura 4.7 – Modelo de elementos de vigas do chassis com uma barra adicional....	31
Figura 4.8 – Deformações no chassis com uma barra adicional.....	31

Figura 4.9 – Vetores de deslocamento dos nós da estrutura com uma barra adicional.....	32
Figura 4.10 – Distribuição de tensões no chassis com uma barra adicional.....	33
Figura 4.11 – Modelo de elementos de vigas com novo posicionamento de barras.....	34
Figura 4.12 – Deformações no chassis com as barras em nova posição.....	34
Figura 4.13 – Vetores de deslocamento dos nós da estrutura com a barra em nova posição.....	35
Figura 4.14 – Distribuição de tensões no chassis com uma novo posicionamento de barras.....	36
Figura 5.1 – Chassis final fabricado em aço SAE 8740.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação entre espessura de parede e diâmetro dos eixos.....	3
Tabela 3.1 – Descrição das famílias de aços, de acordo com acodificação da SAE, onde os dois últimos algarismos (xx) indicam o teor de carbono em 0,01%.....	10
Tabela 3.2 – Propriedades dos materiais pré-selecionados.....	11
Tabela 3.3 – Propriedades dos materiais selecionados.....	12
Tabela 3.4 – Tabela de decisão para alternativa de estrutura.....	20
Tabela 4.1 – Preço x Tipo de aço.....	37

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho se refere ao projeto de um kart para competição, que deve ser homologado de acordo com o Regulamento Técnico da Confederação Brasileira de Automobilismo (CBA).

O projeto desse kart será desenvolvido em conjunto com a Birel Sudam, braço latino-americano da tradicional fábrica italiana Birel.

O kart é o primeiro estágio para o piloto que busca uma carreira no automobilismo, mas também é utilizado como forma de recreação por um grande número de pessoas.

O enfoque deste trabalho será o ambiente de competição, onde o desenvolvimento técnico busca a melhor performance possível, com o objetivo de sempre obter a vitória.

2. ESTUDO DE VIABILIDADE

2.1. ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

A necessidade real do usuário é de utilizar o kart como veículo de competição, ou seja, com o melhor desempenho em pista possível. O kart deve atender ao regulamento técnico da Confederação Brasileira de Automobilismo (CBA), o qual permite a homologação de novos modelos a cada três anos, sendo a próxima válida para o período de 2006 a 2008.

2.2. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA NECESSIDADE

2.2.1. REQUISITOS CONSTRUTIVOS

2.2.1.1. DO REGULAMENTO TÉCNICO (CBA)

De acordo com o Regulamento Nacional de Kart de 2005 (RNK-2005):

- Comprimento máximo de 1600mm.
- Largura máxima de 1400mm.
- Entre-eixos de 1040mm.
- Comprimento máximo do eixo traseiro de 1040mm.
- Assoalho de material rígido, com furos de diâmetro inferior a 10mm.
- Proibido o uso de qualquer tipo de suspensão elástica ou articulada.
- Freios comandados por um só pedal, acionados por sistema hidráulico ou mecânico, atuantes somente nas rodas traseiras, e com disco de freio ventilado.
- Obrigatório o uso de protetor de corrente.
- Os pedais, quando acionados, não podem ultrapassar os elementos fixos do chassis e devem possuir mola de retorno.

- O tanque de combustível deve ser de material plástico, translúcido e com capacidade máxima de 10 litros.
- O eixo, em material ferroso e imantável, deve obedecer à Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Relação entre espessura de parede e diâmetro dos eixos

Diâmetro do eixo (mm)	Espessura mínima da parede (mm)
30	4,9
31	4,7
32	4,5
33	4,2
34	4,0
35	3,8
36	3,6
37	3,4
38	3,2
39	3,1
40	2,9
41	2,8
42	2,6
43	2,5
44	2,4
45	2,3
46	2,2
47	2,1
48	2,0
49	2,0
50	1,9

- Os pára-choques devem ser normatizados de conformidade com o RIK 2002 (Regulamento Internacional de Kart de 2002), sendo obrigatória a utilização da barra suplementar, de conformidade com a Figura 2.1:

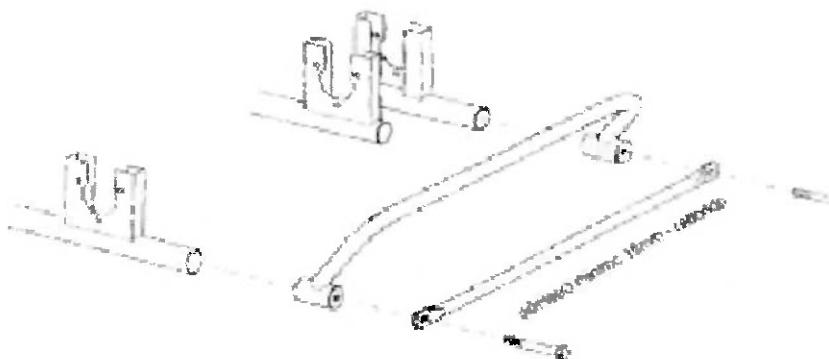


Figura 2.1 – Barra suplementar

- A carroceria deve ser composta por duas carenagens laterais, uma dianteira e um painel frontal, conforme homologação CBA.
- A carenagem lateral não deve ultrapassar a altura de 450mm medida a partir do piso, e deve manter o lado externo dentro do perímetro delimitado pelo plano traçado entre as faces externas do pneu traseiro e dianteiro (alinhados), e o plano traçado entre as linhas limite das bandas de rodagem dos dois pneus (alinhados), de conformidade com a Figura 2.2:



Figura 2.2 – Limites da carenagem

- O painel frontal não deve estar acima de um plano horizontal, passando pelo topo do volante de direção. Ele deve possuir folga mínima de 50mm entre si e o volante, não podendo se projetar além do pára-choque dianteiro. Ele não pode ainda impedir o movimento normal dos pedais, nem cobrir nenhuma parte dos pés na posição normal de pilotagem.

2.2.1.2. DO FABRICANTE

- Para a parte estrutural do chassis, devem ser utilizados apenas tubos de 30mm e/ou 32mm de diâmetro.
- Os eixos a serem utilizados serão os de 40mm e 50mm de diâmetro, que podem ter durezas diferentes.
- O kart deve possuir somente duas barras estabilizadoras, que podem, opcionalmente, ser substituídas por outras de durezas diferentes.

2.2.2. REQUISITOS OPERACIONAIS

- O kart deve ser compatível com motores de dois e quatro tempos, com uma faixa de potência entre 10cv e 45cv.
- O kart deve ser utilizado em pistas asfaltadas, tanto em condições secas como molhadas.
- O kart deve manter um desempenho constante durante pelo menos seis meses.

2.2.3. REQUISITOS FUNCIONAIS

- O kart não deve possuir trincas ou falhas que comprometam a segurança do piloto.

- O kart deve acomodar o piloto de forma que o mesmo consiga completar o máximo permitido de duas horas seguidas em uma corrida, de acordo com a Federação Internacional de Automobilismo.

2.3. ESTRUTURAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE ALTERNATIVAS

Devido às limitações impostas tanto pelo regulamento, quanto pelo fabricante, não é possível partir para uma solução que não seja um kart com um chassis tubular de aço soldado, já que o trabalho a ser desenvolvido é de criar uma nova estrutura, com as mesmas características da anterior, porém mais eficiente. As diferenças entre esse novo chassis e o anterior serão relacionadas ao tipo de liga e à disposição dos tubos, as quais serão tratadas somente no projeto básico. Essa situação também acontece com outras componentes do kart, como a carenagem, que tem de ser fabricada em três partes diferentes, com posições já definidas, não permitindo assim a criação de uma carenagem do tipo “bolha”, que ajudaria na diminuição do arrasto aerodinâmico do kart.

A única decisão ser tomada, é referente a escolha do tipo de sistema de freio a ser implementado. As opções disponíveis, segundo o regulamento, são a mecânica e a hidráulica.

2.4. VIABILIDADE TÉCNICA

Como o projeto se destina a um atual fabricante, não existem restrições quanto aos equipamentos, maquinário e mão-de-obra especializada. Com relação à fabricação de protótipos para teste, esta já é uma prática comum do fabricante, visto que o desenvolvimento de produto é realizado em grande parte por testes em pista.

A única restrição técnica do projeto, diz respeito à aquisição de ligas especiais para a fabricação de protótipos, visto que esse tipo de matéria-prima só é fornecida em quantidades geralmente superiores a uma tonelada.

2.5. VIABILIDADE ECONÔMICA

O mercado de competição é caracterizado por ter como o fator limitante de compra o desempenho do veículo, e não o seu preço de venda. É claro que variações muito grandes entre os preços dos concorrentes são consideráveis, já que as equipes tem um orçamento anual a ser cumprido. Como não haverá desenvolvimento técnico significativo nos processos de fabricação e matérias-primas, estima-se que os custos envolvidos com estes não elevarão o preço do produto final em mais de 10%, o que seria facilmente absorvido pelo mercado de acordo com os históricos de venda do fabricante.

3. PROJETO BÁSICO

3.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS

O objetivo da seleção de materiais é a definição do material que melhor se adapta às necessidades do projeto. Entretanto, um dos requisitos do projeto, imposto pelo Regulamento Nacional de Kart (RNK), é que a estrutura seja fabricada em aço, limitando a seleção a ligas desse material.

Por outra imposição do Regulamento, é proibida a utilização de qualquer tipo de suspensão nos chassis de kart. Nos carros onde o uso de suspensão é permitido, o chassis deve possuir a maior rigidez torcional possível, para que a geometria da suspensão projetada se mantenha inalterada durante o uso do veículo. Já no kart, o próprio chassis deve desempenhar a função da suspensão, através de uma torção limitada da própria estrutura.

Portanto, o parâmetro a ser utilizado não necessariamente deve ser o de maior rigidez torcional, como num automóvel comum, mas sim o de maior resistência mecânica sem deformação permanente, ou seja, o material deve ser exigido somente no seu regime elástico.

Para alterar as propriedades do aço, como a tensão de escoamento, de forma a obter as que mais se adequam aos requisitos do projeto, podem ser adicionados a ele alguns elementos de liga.

Os efeitos de alguns elementos de liga são:

- **Cromo** (Cr): melhora a resistência à corrosão (aço com cerca de 12% Cr resiste à ação da água e de vários ácidos), aumenta a resistência à tração (em média, 80 MPa para cada 1% de cromo), melhora a facilidade de têmpera, aumenta a resistência à alta temperatura e ao desgaste.
- **Manganês** (Mn): em média, para cada 1% de manganês, a resistência à tração aumenta 100 MPa. Para aços temperáveis, aumenta a dureza após o processo de têmpera.

- **Molibdênio (Mo)**: melhora a resistência a altas temperaturas, a resistência ao desgaste e a dureza após a têmpera. Para aços inoxidáveis, melhora a resistência à corrosão.
- **Níquel (Ni)**: em média, para cada 1% de níquel, a resistência à tração aumenta 40 MPa mas o limite de elasticidade é mais favorecido. Melhora significativamente a capacidade de têmpera, possibilitando redução da velocidade de resfriamento. O níquel altera a allotropia do ferro e teores acima de 25% fazem reter a austenita em temperaturas usuais, fazendo um aço austenítico que também é não magnético e bastante resistente à corrosão. Com 36% de Ni, o aço tem o menor coeficiente de dilatação térmica e é usado em instrumentos de medição. Em conjunto com o cromo, o aço pode ser austenítico com a combinação 18% Cr e 8% Ni.

Algumas famílias de aços que podem ser utilizados são ilustrados na tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Descrição das famílias de aços, de acordo com acodificação da SAE, onde os dois últimos algarismos (xx) indicam o teor de carbono em 0,01%

Código SAE	Descrição ou principais elementos de liga
10xx	Aços-carbono de uso geral
41xx	Cromo (0,50 ou 0,95%), molibdênio (0,12 ou 0,20%)
43xx	Níquel (1,80%), cromo (0,50 ou 0,80%), molibdênio (0,25%)
46xx	Níquel (1,55 ou 1,80%), molibdênio (0,20 ou 0,25%)
47xx	Níquel (1,05%), cromo (0,45%), molibdênio (0,25%)
48xx	Níquel (3,50%), molibdênio (0,25%)
86xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50 ou 0,65%), molibdênio (0,20%)
87xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50%), molibdênio (0,25%)
93xx	Níquel (3,25%), cromo (1,20%), molibdênio (0,12%)
94xx	Manganês (1,00%), níquel (0,45%), cromo (0,40%), molibdênio (0,12%)
97xx	Níquel (0,55%), cromo (0,17%), molibdênio (0,20%)
98xx	Níquel (1,00%), cromo (0,80%), molibdênio (0,25%)

Outro aspecto, muito importante para aços usados em estruturas, é a facilidade de soldagem. O aumento do teor de carbono torna o aço mais difícil de ser soldado, conforme ilustração da figura 3.1:

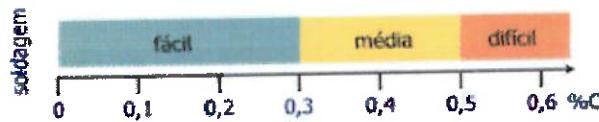


Figura 3.1 – Facilidade de soldagem do aço, em relação ao seu teor de carbono

Portanto, considerando as famílias de aços de alta resistência, e que para efeitos de soldagem o aço deve ter um teor de carbono de 0,3% ou 0,4%, pode-se pré-selecionar alguns materiais, cujas propriedades estão indicadas na tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Propriedades dos materiais pré-selecionados

Aço	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
1030	205	345	525
4130	205	435	670
8630	205	550	620
1040	205	370	595
4140	205	655	1020
4340	205	860	1280
8640	205	931	945
8740	205	550	930

Como o parâmetro escolhido foi o de maior resistência sem deformação plástica, os materiais com maior tensão de escoamento podem ser considerados os mais adequados. Entretanto, a diferença entre a tensão de escoamento e a tensão de ruptura deve ser razoavelmente grande, pois no caso de um choque, o chassis deve se deformar para absorver a energia do impacto. No caso de a diferença entre as tensões ser pequena, o chassis pode colapsar logo após choque, absorvendo uma quantidade pequena da energia do choque. Pode-se agora refinar os resultados, selecionando alguns dos aços da tabela 3.2, mostrados agora na tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Propriedades dos materiais selecionados

Aço	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
4130	205	435	670
4140	205	655	1020
4340	205	860	1280
8740	205	550	930

Não se pode esquecer que os aços de alta resistência tem um preço elevado, o que acarreta em custos mais elevados de produção. Entretanto, um eventual aumento de preço no kart não tem grande influência na venda do produto, já que, como citado anteriormente, o fator limitante de compra do kart é o desempenho, e não o preço.

3.2. ALTERNATIVAS DE ESTRUTURAS

O Regulamento técnico especifica que o chassis deve ser feito de tubos de aço imantável, e deve ter dimensões máximas de 1500mm de comprimento e de 750mm de largura, já que as dimensões máximas externas do veículo completo, de 1600mm de comprimento e de 1400mm de largura, já incluem as carenagens e rodas, que possuem dimensões também padronizadas. A partir dessas informações, o desenho mais simples de chassis é de formato retangular com as medidas limites, como na figura 3.2:

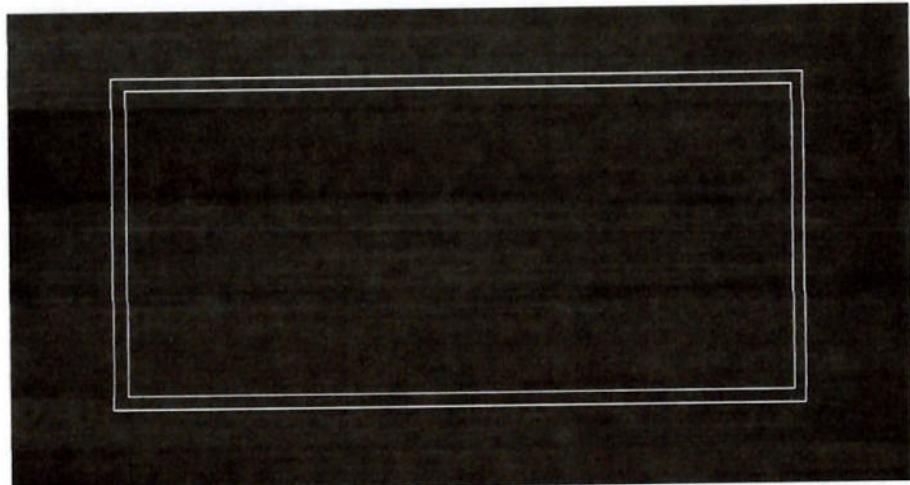


Figura 3.2 – Desenho Básico

Para que exista o espaço suficiente para permitir a movimentação das rodas dianteiras, devido ao funcionamento do sistema de direção, devem ser criadas algumas reentrâncias na parte frontal do desenho básico, assim o mesmo evolui para o desenho mostrado na figura 3.3:

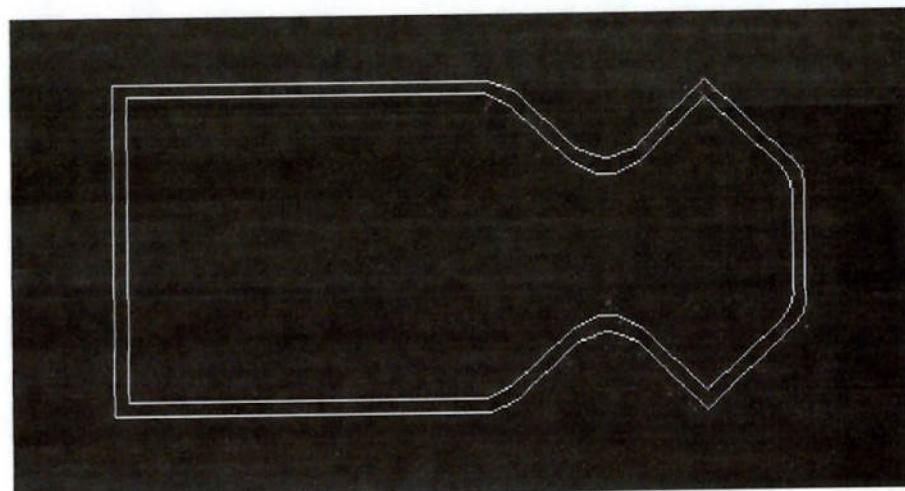


Figura 3.3 – Evolução do desenho para permitir movimentação das rodas dianteiras

O Regulamento obriga que uma longarina adicional seja adicionada no lado direito da estrutura para fins de fixação padrão do motor, que pode ser de dois ou quatro tempos, com potências variando entre 10 e 45 cavalos. Essa longarina deve ser colocada a uma distância de 60mm da longarina direita do chassis, como indicado na figura 3.4:

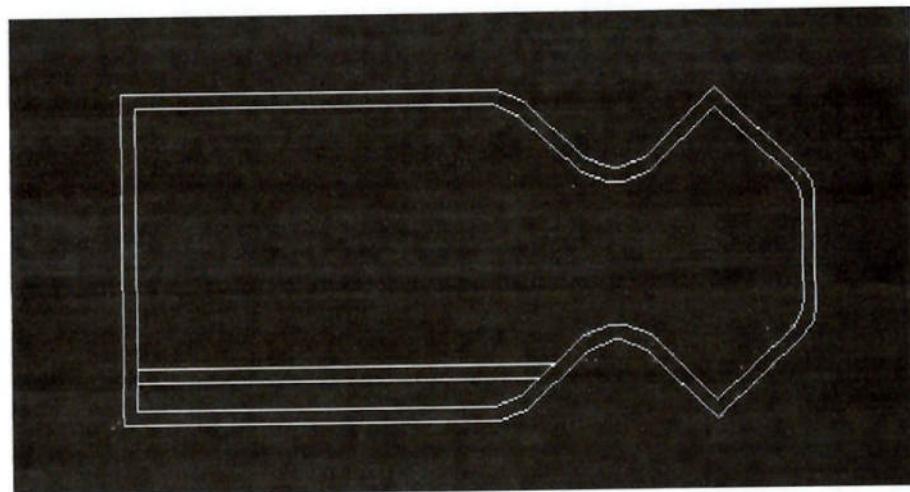


Figura 3.4 – Estrutura com a longarina para fixação do motor

Outra imposição do Regulamento é que o pára-choque traseiro seja removível, como já foi mostrado na figura 2.1. A estrutura deve então ser modificada conforme a figura 3.5:

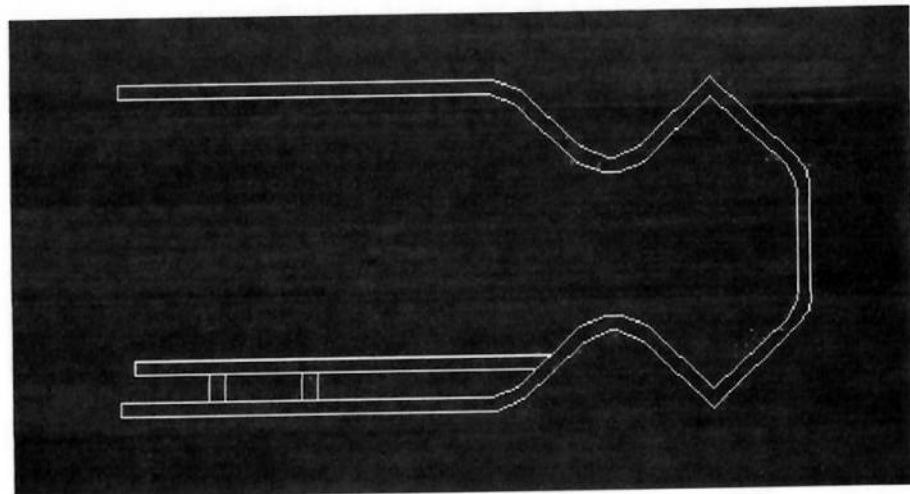


Figura 3.5 – Estrutura modificada para utilização de pára-choque traseiro removível

As modificações realizadas até agora, visando o cumprimento do Regulamento, resultam numa estrutura que, para um cálculo inicial, pode ser aproximada por uma estrutura em forma de “U”, com aproximadamente 1500mm de comprimento e 750mm de largura.

Pode-se calcular o deslocamento de uma das extremidades da estrutura, através da aplicação de um carregamento sobre esta extremidade, enquanto a outra se encontra engastada, como na figura 3.6:

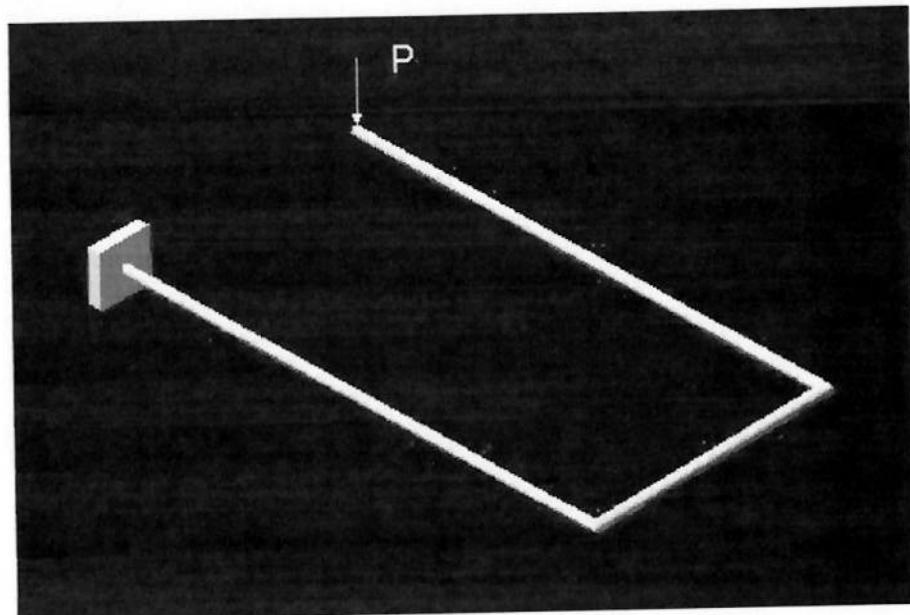


Figura 3.6 – Modelo aproximado para o cálculo do deslocamento da extremidade da estrutura

De acordo com o 2º Teorema de Castigliano, o deslocamento de um ponto de uma estrutura pode ser dado por:

$$\delta = \frac{\partial U^*}{\partial P} = \frac{\partial U}{\partial P} \quad (3.1),$$

onde:

- δ é o deslocamento;
- U^* e U são, respectivamente, as energias complementar e de deformação totais do sistema;
- P é o carregamento.

Como:

$$U^* = U = \sum \left(\int \frac{M^2}{2EI} dx + \int \frac{T^2}{2GJ} dx \right) \quad (3.2),$$

então:

$$\delta = \sum \left(\int \frac{M}{EI} \cdot \frac{\partial M}{\partial P} dx + \int \frac{T}{GJ} \cdot \frac{\partial T}{\partial P} dx \right) \quad (3.3),$$

onde:

- M é o momento fletor;
- E é o módulo de elasticidade;
- I é o momento de inércia da seção transversal da viga;
- T é o torque;
- G é o módulo de elasticidade no cisalhamento;
- J é o momento de inércia polar.

Calculando os esforços solicitantes ao longo da estrutura, e substituindo os valores na expressão do deslocamento 3.3, descrita anteriormente, o seguinte resultado é obtido:

$$\delta = \frac{79PL^3}{48EI} \quad (3.4),$$

onde L é o comprimento da estrutura.

Se for considerado que, por imposições do Regulamento e da fábrica, a estrutura deve ser fabricada de tubos de aço com diâmetro externo de 30mm ou 32mm e parede de 2mm, os seguintes dados gerais podem ser utilizados:

- $E = 200GPa$;
- $I = \frac{\pi d^3 t}{4} = 3,45 \cdot 10^{-8} m^4$;
- $L = 1,5m$.

Assim, chega-se a seguinte expressão que relaciona o deslocamento ao carregamento aplicado:

$$\delta = 8,05 \cdot 10^{-4} \cdot P \quad (3.5)$$

Ao considerar que o kart completo, com o piloto, deve possuir uma massa mínima de 140kg, e que o mesmo sofre acelerações laterais da ordem de 30m/s², pode-se calcular um carregamento subestimado $P = 500\text{N}$ que, ao ser substituído na expressão anterior, resulta num deslocamento $\delta = 0,4025\text{m}$.

Um deslocamento dessa ordem torna impossível o funcionamento do veículo. Por esse motivo torna-se necessária a adição de barras transversais na estrutura para garantir a sua rigidez, e o funcionamento do kart.

Assim, o desenho do chassis é alterado, como ilustra a figura 3.7:

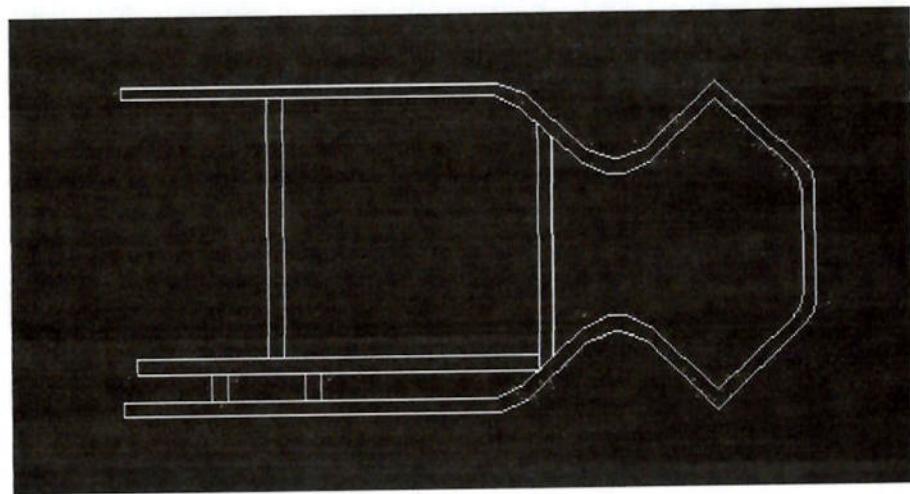


Figura 3.7 – Tipo de estrutura a ser utilizado

A partir da evolução apresentada, é possível concluir que é inevitável a semelhança visual entre os projetos de kart, sendo que a diferença de desempenho está nos detalhes do projeto e na qualidade de execução do mesmo.

Com base no tipo de estrutura apresentada, pode-se então desenvolver algumas alternativas, com mesmas características gerais, mas desenhos diferentes. Algumas alternativas podem ser vistas na figura 3.8:

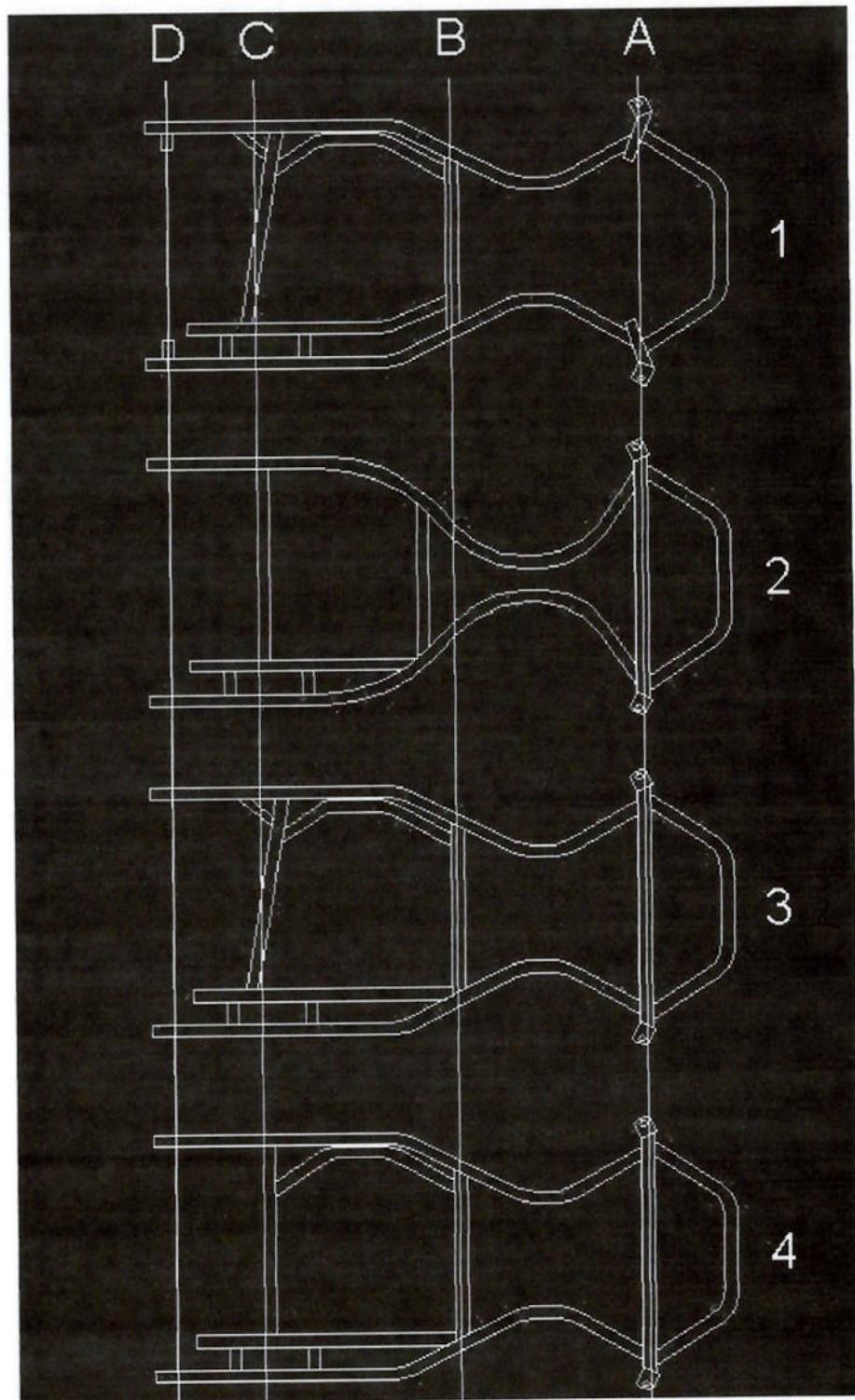


Figura 3.8 – Alternativas de estruturas

Para decidir qual das 4 alternativas é a mais adequada, pode-se fazer uma tabela de decisão, com os seguintes parâmetros de decisão:

- **Presença de barras transversais removíveis:** como já citado anteriormente, num kart é proibida a presença de suspensões, assim o próprio chassis deve desempenhar a função das mesmas, através de uma torção limitada da própria estrutura. O ideal no entanto é que essa rigidez possa ser variada, criando um importante parâmetro de regulagem no kart. Isso pode ser realizado através da utilização ou não de diferentes barras estabilizadoras removíveis;
- **Presença da longarina auxiliar esquerda:** desempenha função análoga às barras transversais removíveis, quanto a regulagem da rigidez da estrutura do chassis, diferindo no meio de funcionamento. Ao invés de ser removível, ela é presa à longarina esquerda por meio de garras;
- **Distância mínima entre as longarinas:** influí no espaço necessário para a colocação de sistemas auxiliares, como sistema de direção e de armazenamento de combustível.

Tabela 3.4 – Tabela de decisão para alternativa de estrutura

Parâmetro	Peso	Alternativa							
		1		2		3		4	
		Nota	NxP	Nota	NxP	Nota	NxP	Nota	NxP
Presença de barras transversais removíveis	30%	10	3	0	0	0	0	0	0
Presença da longarina auxiliar esquerda	25%	10	2,5	0	0	10	2,5	10	2,5
Distância mínima entre as longarinas	45%	8	3,2	4	1,6	8	3,2	8	3,2
Total	100%		8,7		1,6		5,5		5,5

Considerando que nos parâmetros que se referem a presença ou não de elementos pode-se somente atribuir a nota máxima ou mínima, respectivamente, chega-se a conclusão que o tipo de estrutura mais adequado é o tipo mostrado na alternativa 1, mostrada na figura 3.9:

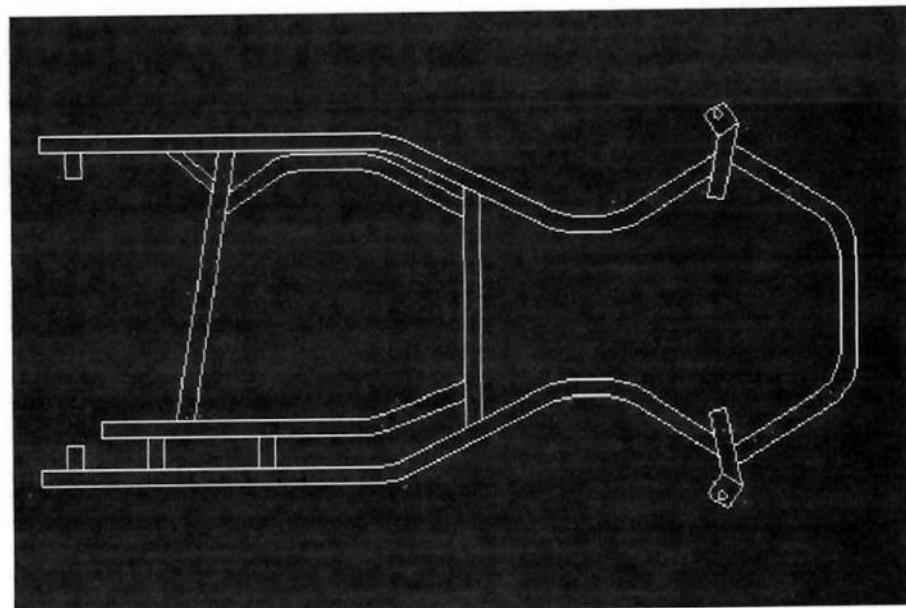


Figura 3.9 – Chassis selecionado

Outro fato importante da estrutura que deve ser mencionado, é que devido à montagem do eixo traseiro, as fixações das rodas dianteiras devem ser deslocadas verticalmente, para que o quadro se mantenha paralelo ao chão. Isso pode ser mostrado pela vista lateral do chassis, como na figura 3.10:

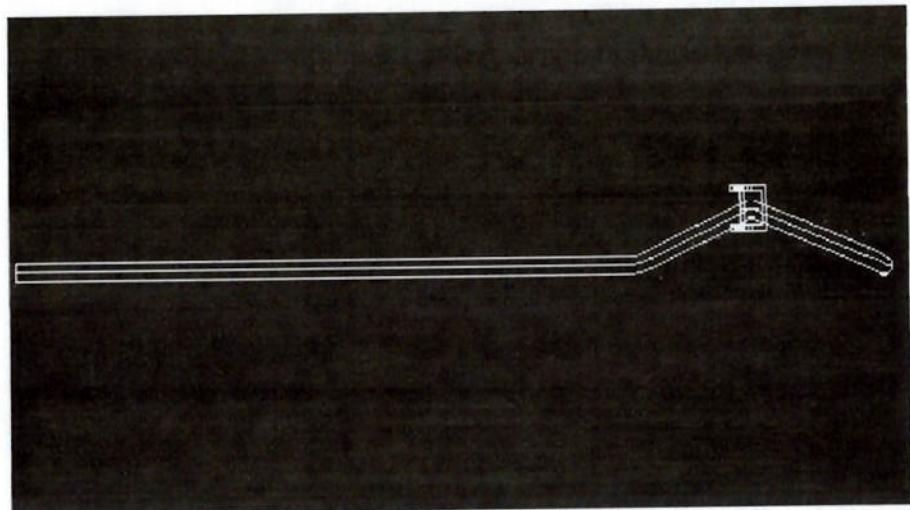


Figura 3.10 – Vista lateral do chassis

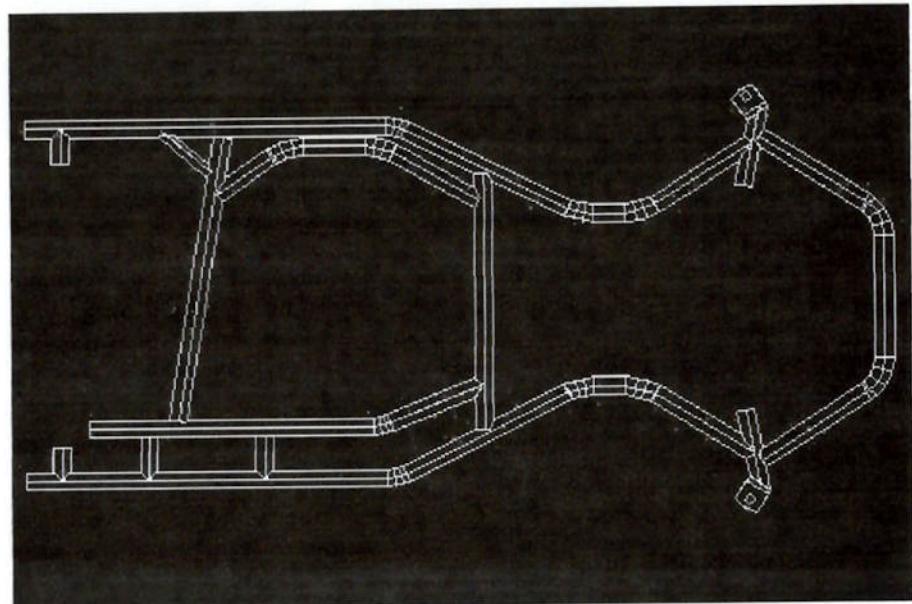


Figura 3.11 – Vista superior do chassis

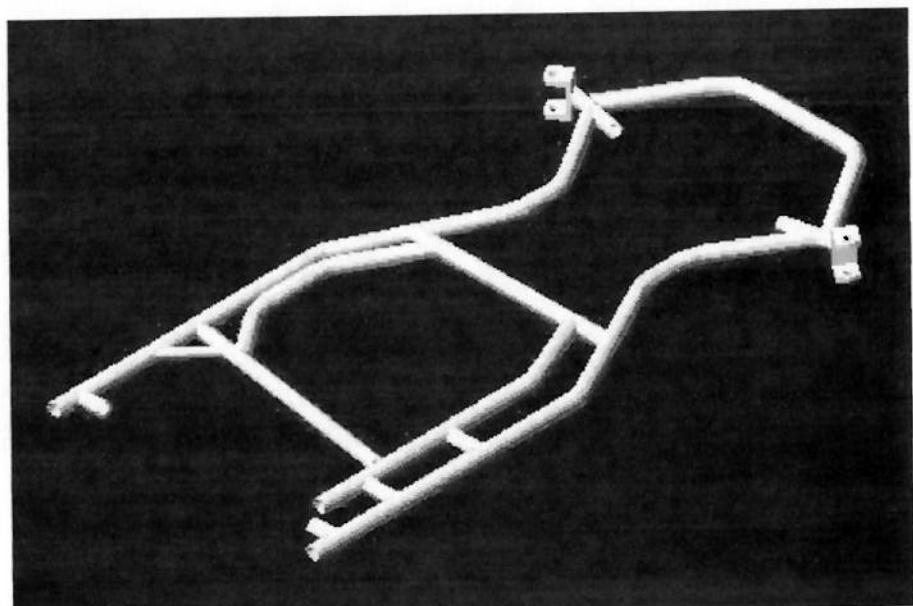


Figura 3.12 – Perspectiva isométrica renderizada do chassis

4. ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

4.1. MODELO

Após a seleção do chassis base, devem ser definidos os carregamentos aos quais o mesmo será submetido durante o funcionamento do kart.

Com o auxílio de sistemas de aquisição de dados ou telemetria é possível quantizar esses carregamentos, através dos dados de aceleração do kart.

Isso pode ser demonstrado pelo gráfico de velocidade, rotação do motor, posição do volante e aceleração lateral em função do espaço de uma volta do kart.

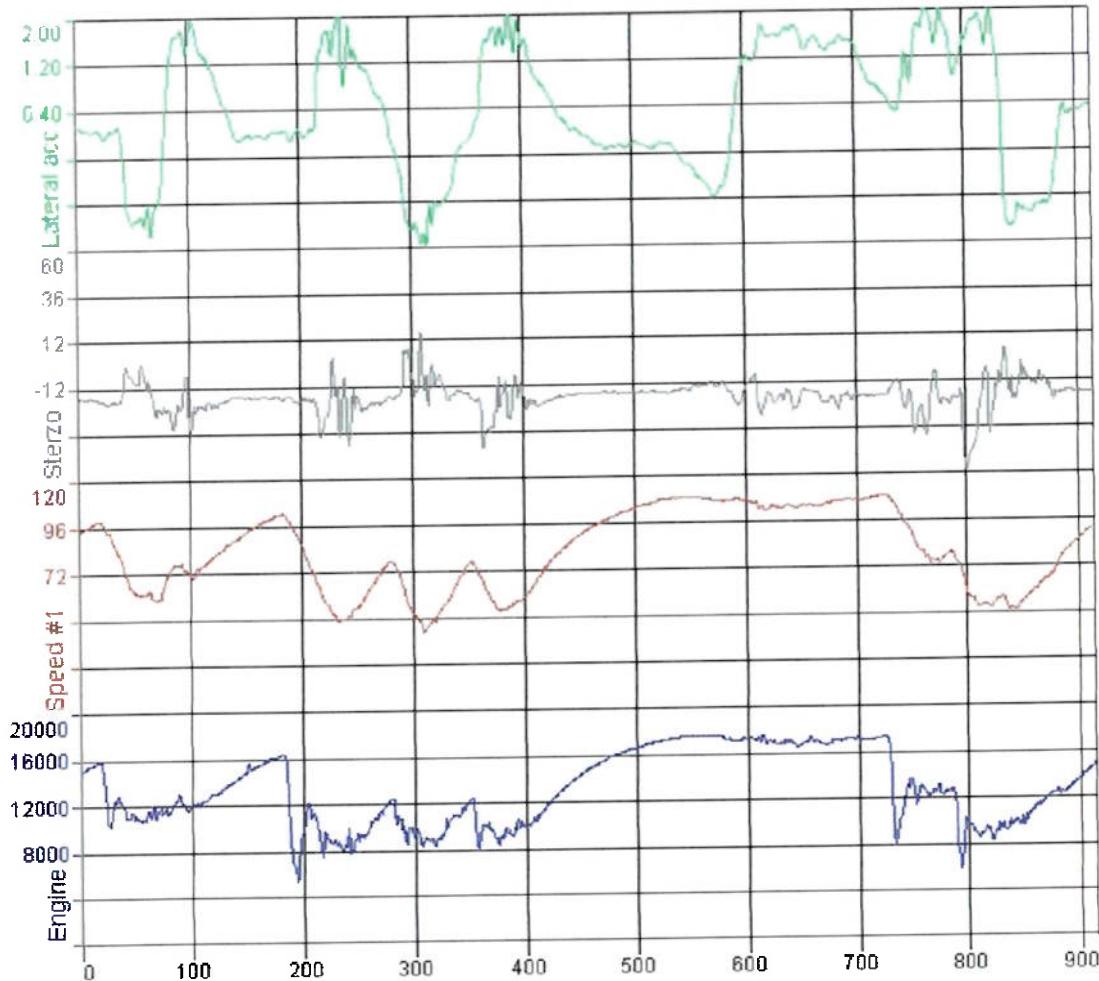


Figura 4.1 – Gráfico de aceleração lateral, posição do volante, velocidade e rotação do motor em função do espaço

Como pode ser observado na figura 4.1, os valores críticos de aceleração lateral são da ordem de 2G (20 m/s^2). Se for considerado que as massas que mais influenciam nos carregamentos que atuam no chassis são o piloto e o motor, podemos calcular estes carregamentos através da simulação de uma força, resultado do produto da massa do corpo pela aceleração lateral, aplicada ao centro de gravidade deste corpo. Isso pode ser ilustrado pela figura 4.2:

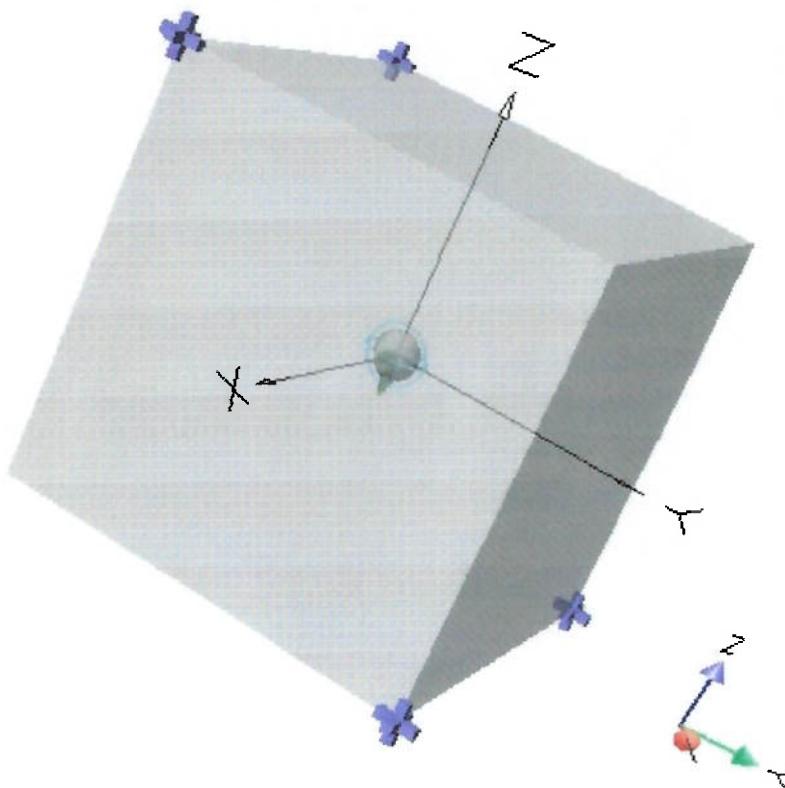


Figura 4.2 – Simulação de carregamentos aplicados ao chassis pelo corpo do piloto

Utilizando o programa visualNastran 4D 2004, é possível calcular os carregamentos em cada um dos 4 pontos de fixação do banco no chassis. O mesmo procedimento pode ser utilizado para o motor.

Uma vez que todos os carregamentos foram definidos, deve ser criado um modelo de elementos de viga do chassis. Para essa etapa será utilizado o programa Ansys.

Para criar o modelo de elementos de viga do chassis, primeiro devem ser estabelecidos quais tipos de viga serão utilizados, que neste caso são vigas tridimensionais de comportamento elástico-linear. O próximo passo é a configuração da seção transversal e do material da viga. As características da seção do tubo são calculadas para um tubo de diâmetro externo de 30mm com uma espessura de parede de 2mm. Já os dados do material utilizados são o Módulo de Young e o Coeficiente de Poisson característicos para qualquer tipo de aço. São então criados os keypoints, pontos de contato entre as vigas, e a junção destes por uma linha define cada elemento de viga. Como será feita uma análise estática, para simular uma situação crítica do chassis, os pontos de fixação das rodas serão engastados e os carregamentos serão aplicados aos pontos de fixação das massas na geometria.

Para que a solução seja feita é necessária a criação de uma malha na geometria. Define-se então a distância entre os nós nos elementos, e a malha é criada. O resultado é o modelo pronto para a solução, como se pode ver na figura 4.3:

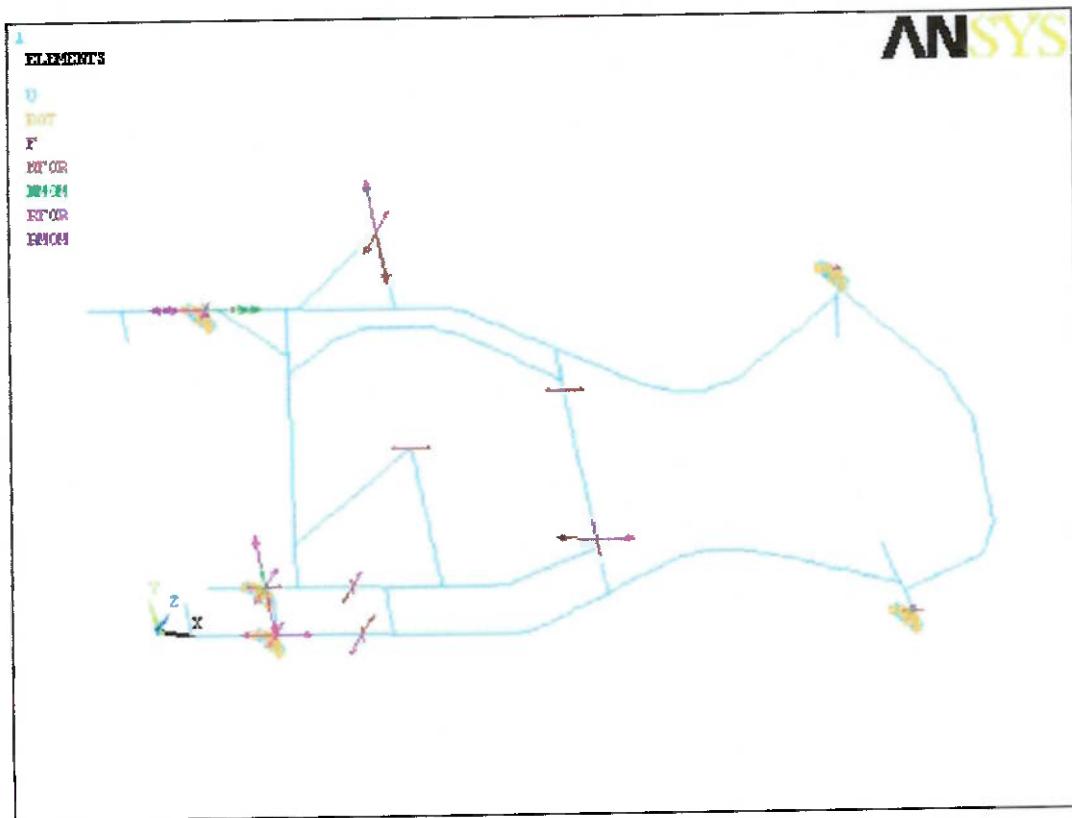


Figura 4.3 – Modelo de elementos de vigas do chassis

4.2. SOLUÇÃO

A partir da solução do modelo obtido anteriormente, são fornecidos os dados de deformação, deslocamentos e tensões do chassis.

A figura 4.4 mostra a comparação entre a geometria original e a mesma deformada após serem aplicados os carregamentos.

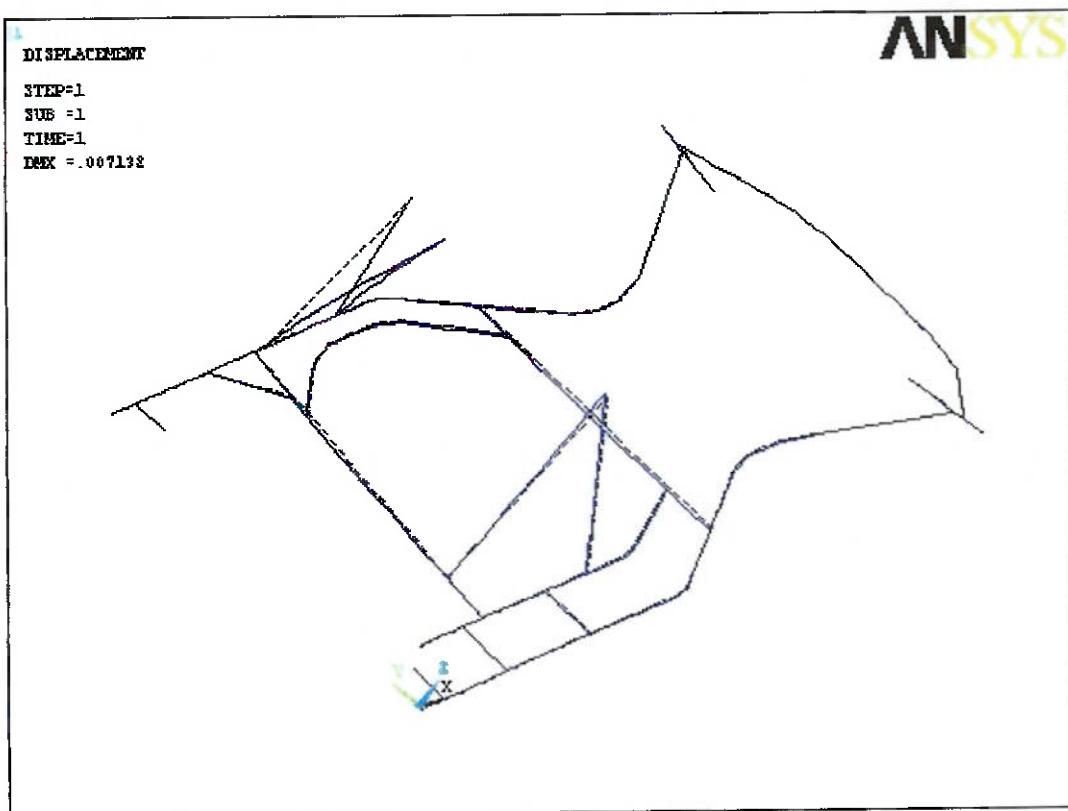


Figura 4.4 – Deformações no chassis após a aplicação dos carregamentos

As deformações no chassis são obtidas através do deslocamento sofrido por cada um dos nós. A figura 4.5 mostra o vetor de deslocamento para todos os nós do modelo.

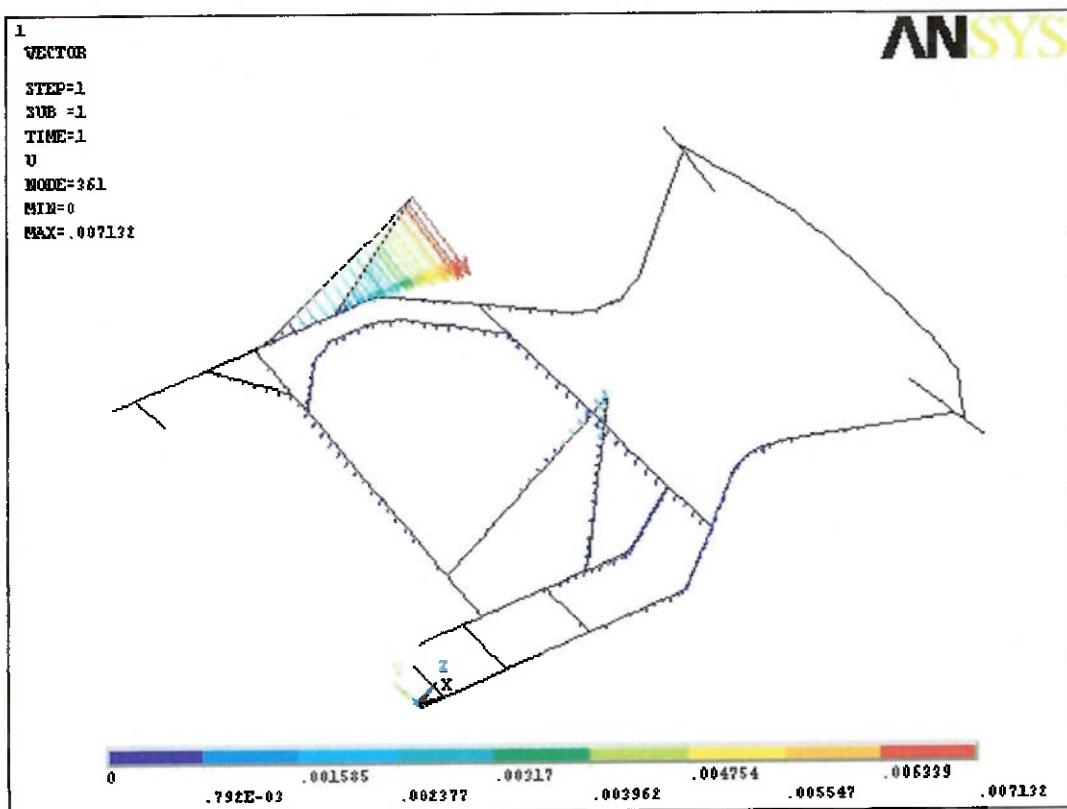


Figura 4.5 – Vetores de deslocamento de todos os nós da estrutura

É possível observar que o máximo deslocamento obtido foi da ordem de 7mm, na fixação superior esquerda do banco, valor este, que pode ser considerado seguro para o perfeito funcionamento do kart, ainda mais se for levado em conta que nos pontos de fixação dos eixos e do motor, os deslocamentos não chegam a ultrapassar o valor de 1mm.

Como foi citado anteriormente, o chassis deve funcionar dentro da região elástico-linear do seu material, ou seja, as tensões internas da estrutura não devem ultrapassar a tensão de escoamento do material.

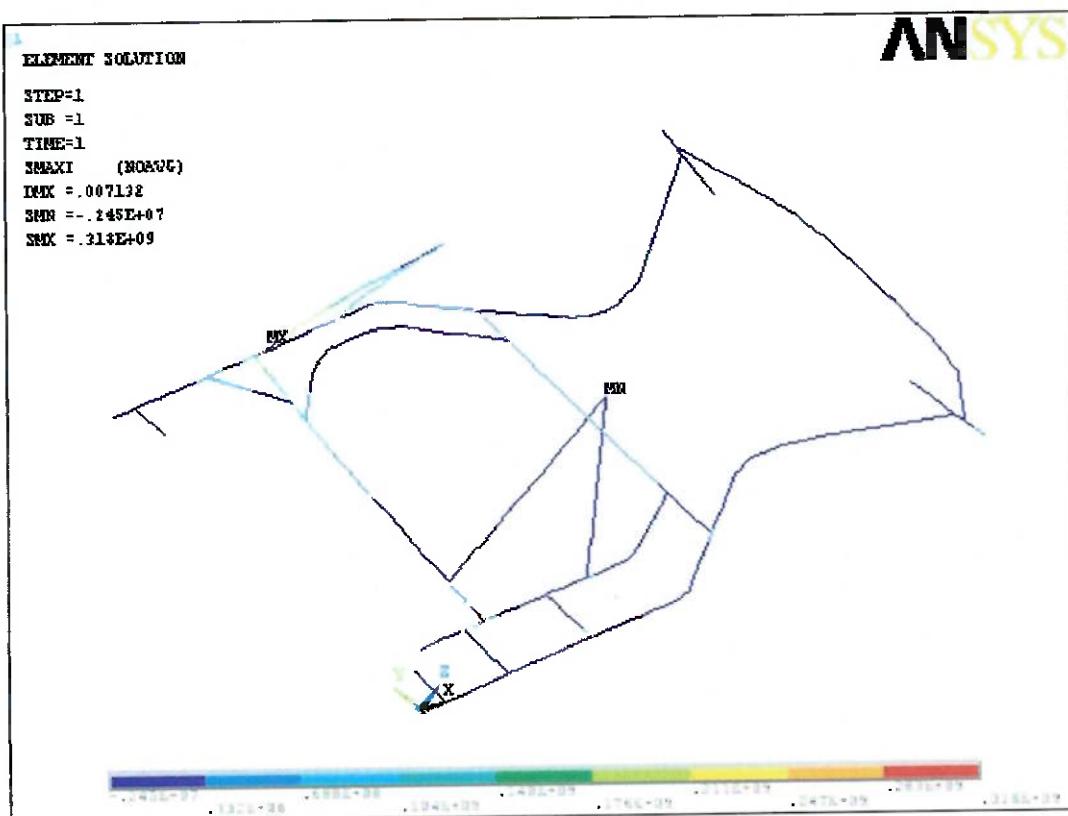


Figura 4.6 – Distribuição de tensões no chassis

Conforme indica a figura 4.6, o máximo valor de tensão na estrutura é de 318MPa. Ao comparar este valor com o menor valor de tensão de escoamento dentre os 4 materiais selecionados, que é de 435MPa, é possível concluir que qualquer um desses materiais pode ser utilizado na fabricação do chassis.

A fim de reduzir o único pico de tensão, que ocorre na base do apoio esquerdo do banco, propõe-se duas alternativas. A primeira é a adição de uma nova barra. A segunda é a alteração do posicionamento da barra na qual ocorre o ponto de máxima tensão do chassis.

A seguir será analisada a primeira alternativa, a qual tem a finalidade de distribuir a carga aplicada no apoio esquerdo do banco em mais uma barra.

A figura 4.7 mostra o novo modelo de elementos de vigas, já com a barra adicional.

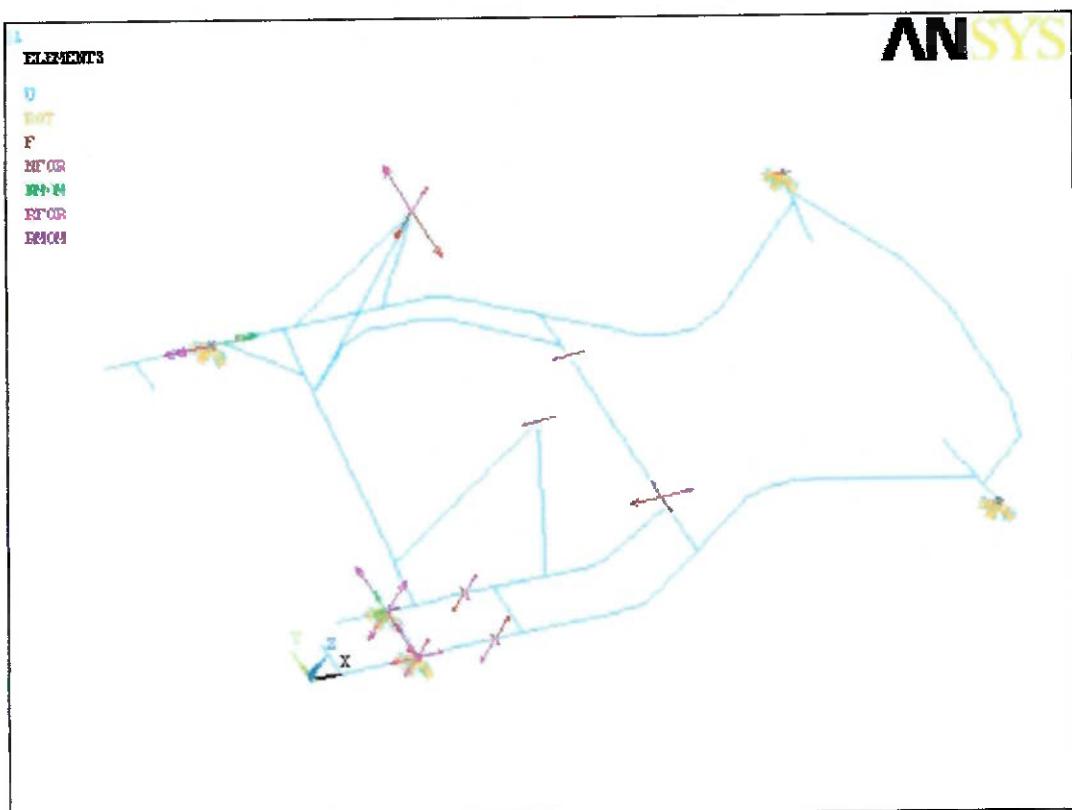


Figura 4.7 – Modelo de elementos de vigas do chassis com uma barra adicional

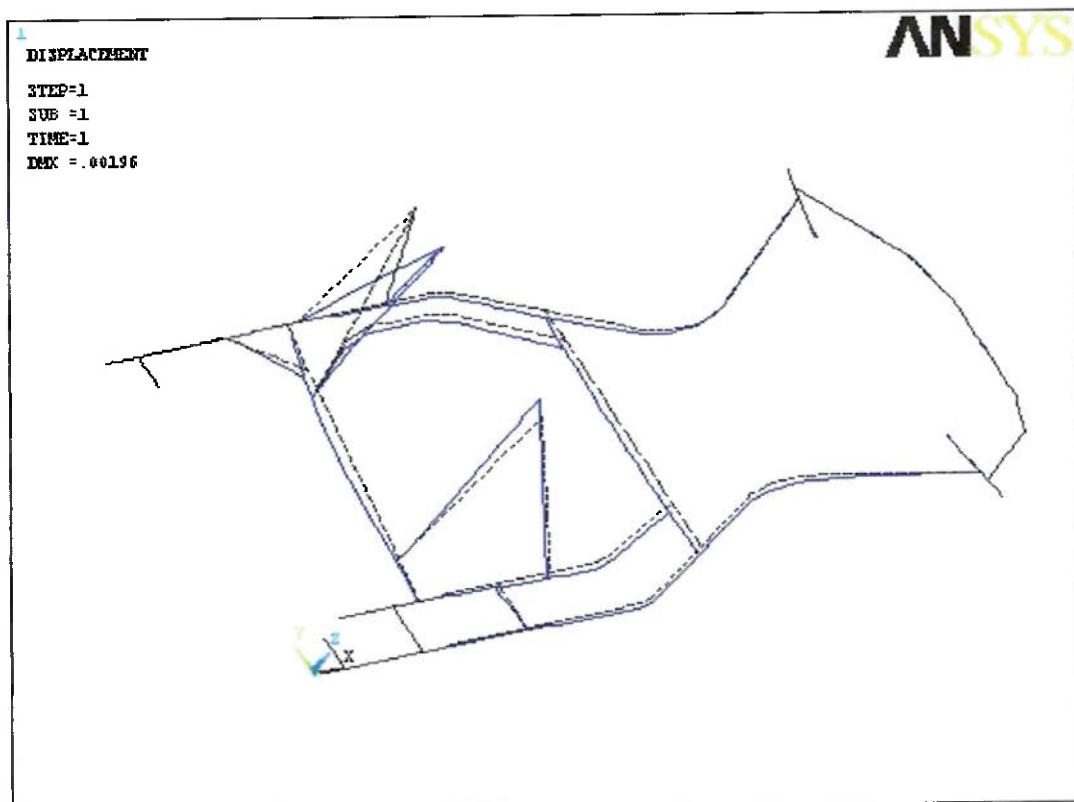


Figura 4.8 – Deformações no chassis com uma barra adicional

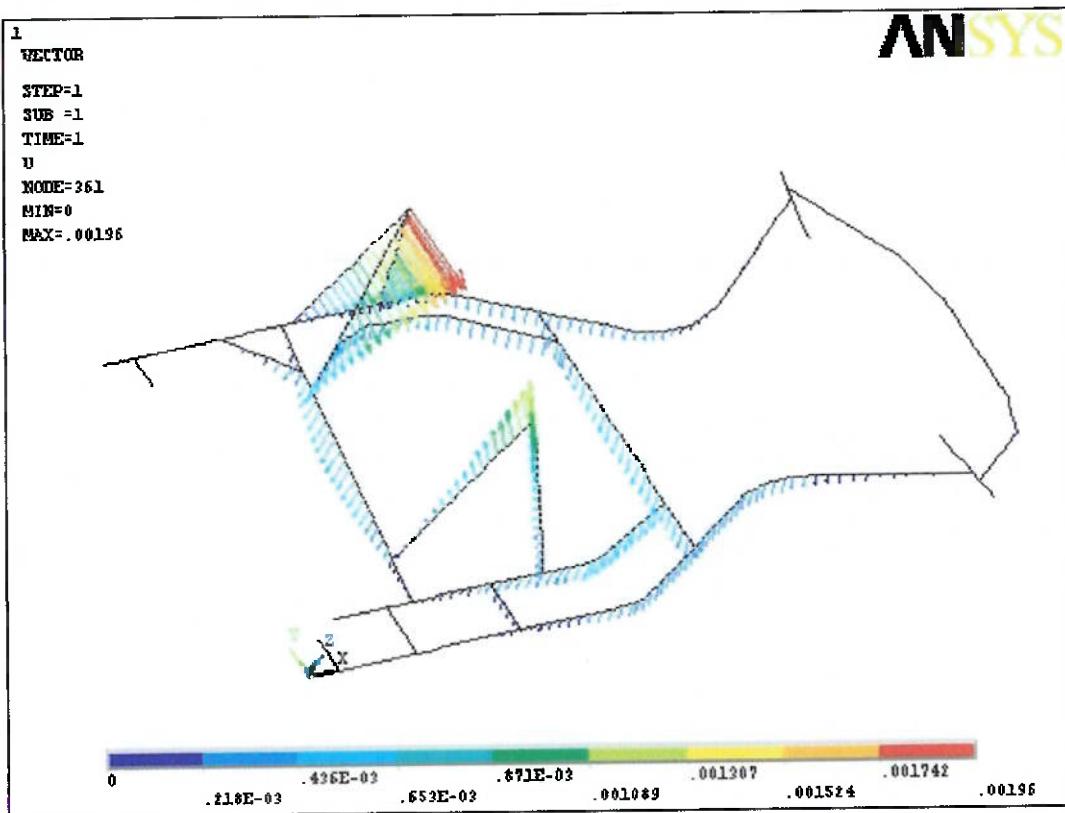


Figura 4.9 – Vetores de deslocamento dos nós da estrutura com uma barra adicional

Percebe-se que o ponto onde ocorre o máximo deslocamento continua o mesmo, porém houve uma significativa redução no seu valor, que é agora de 1,96mm, ante os 7,13mm registrados anteriormente. Como a maior parte do deslocamento no ponto de fixação superior esquerdo do banco, que é o máximo deslocamento da estrutura, resulta da rotação da longarina esquerda, a base da barra adicionada tem que estar soldada em outra que não seja a própria longarina, assim suavizando a rotação da mesma.

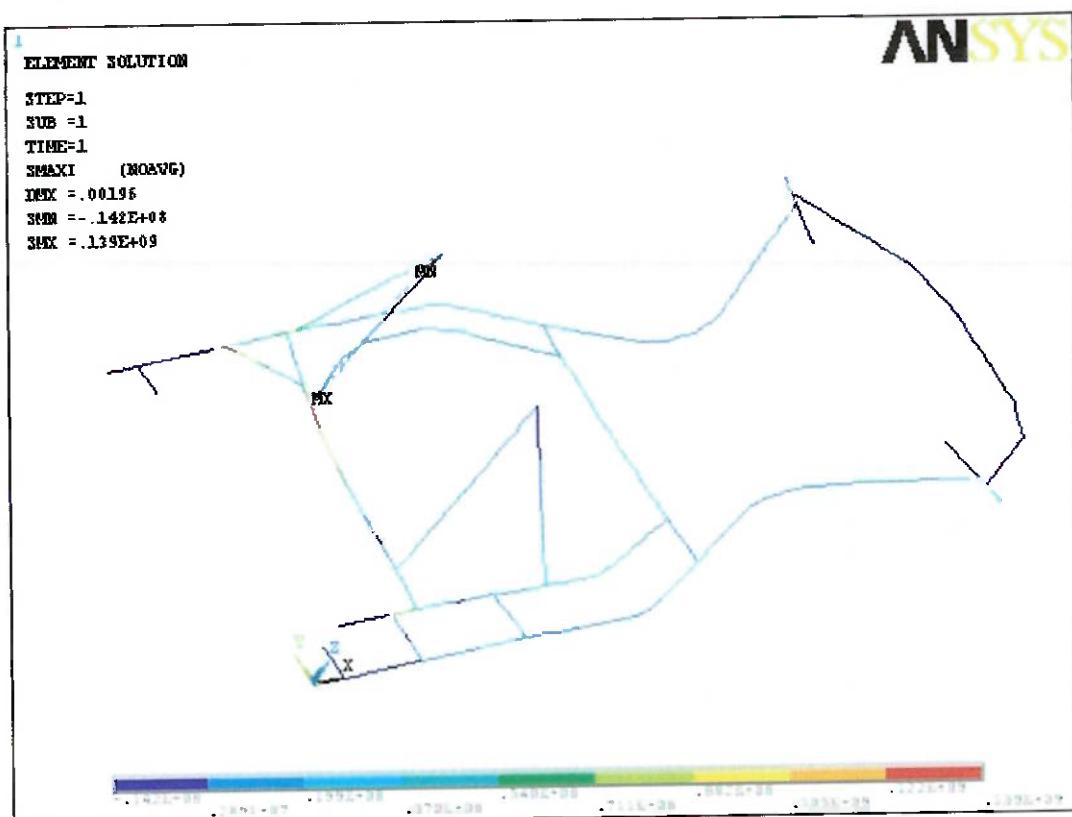


Figura 4.10 – Distribuição de tensões no chassis com uma barra adicional

O valor da tensão máxima obtida, de 139MPa, é muito inferior ao valor anterior (aproximadamente 56% menor), o que possibilita a utilização de um aço comum, como o aço 1030, resultando num coeficiente de segurança razoavelmente alto, de 2,5. Entretanto, a utilização da nova barra implica num aumento da massa do chassis, o que pode prejudicar o seu desempenho.

Será analisada então a segunda alternativa para verificar se um posicionamento diferente das barras é suficiente para diminuir a concentração de tensões, ou se a adição de uma nova barra é realmente necessária.

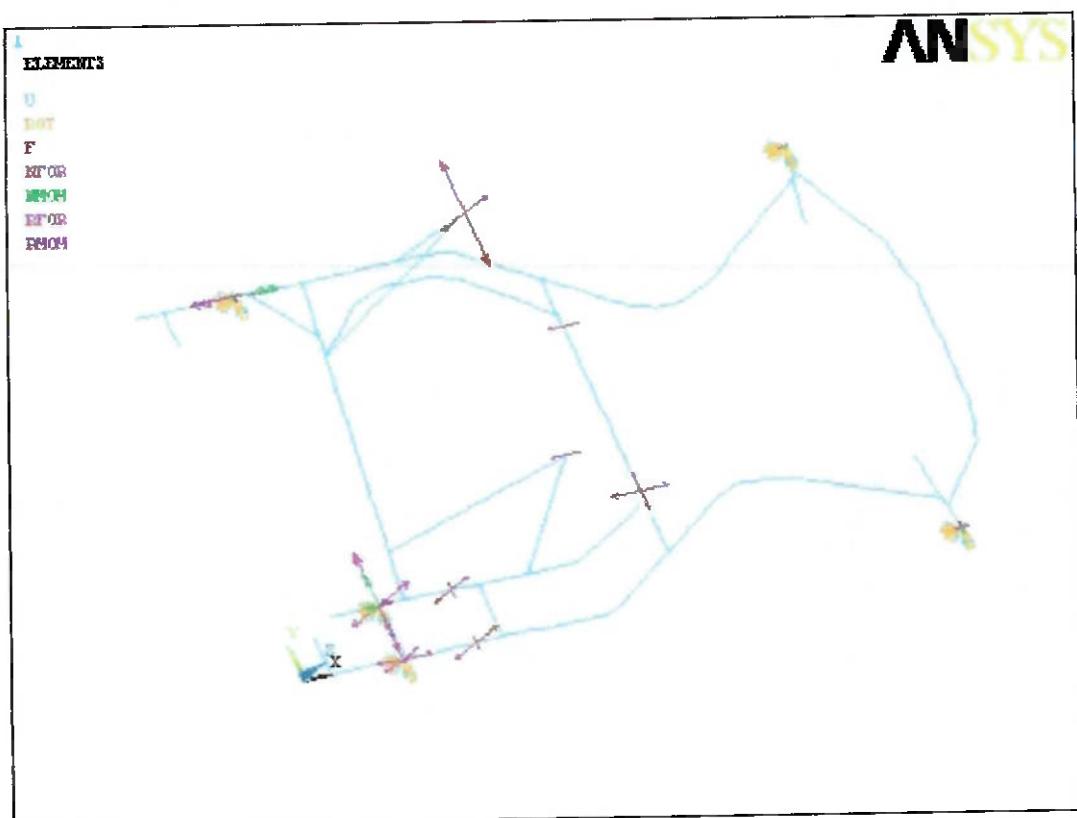


Figura 4.11 – Modelo de elementos de vigas com novo posicionamento de barras

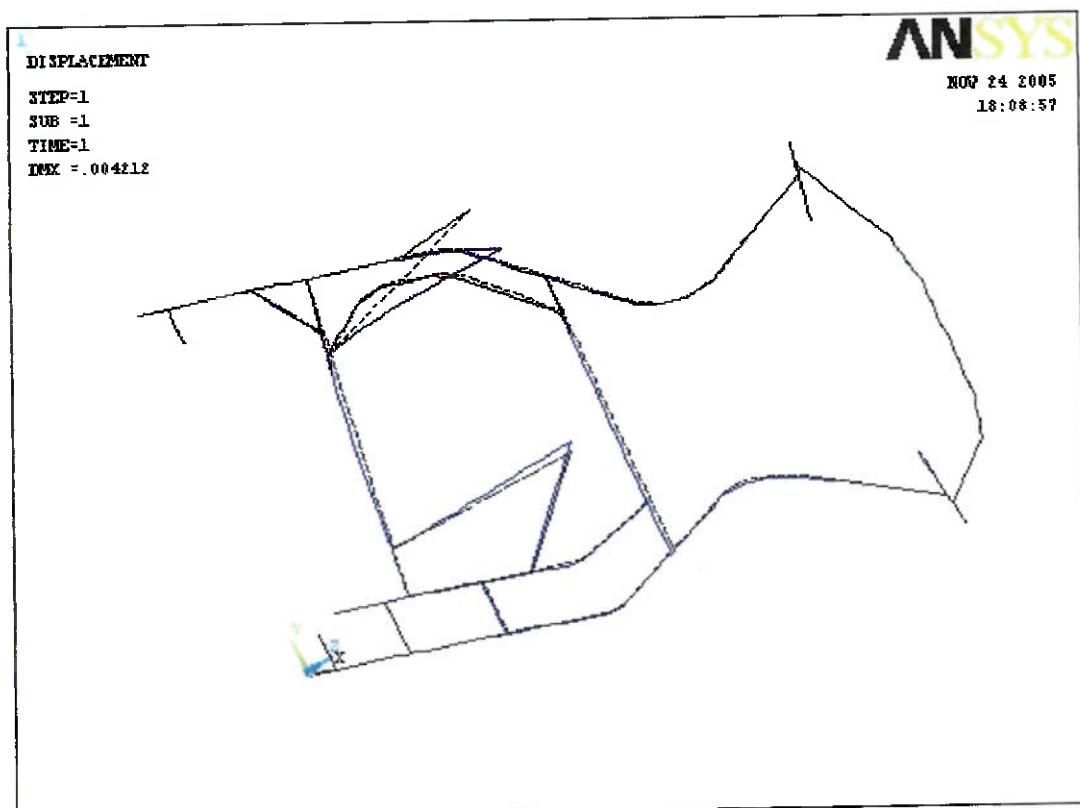


Figura 4.12 – Deformações no chassis com as barras em nova posição

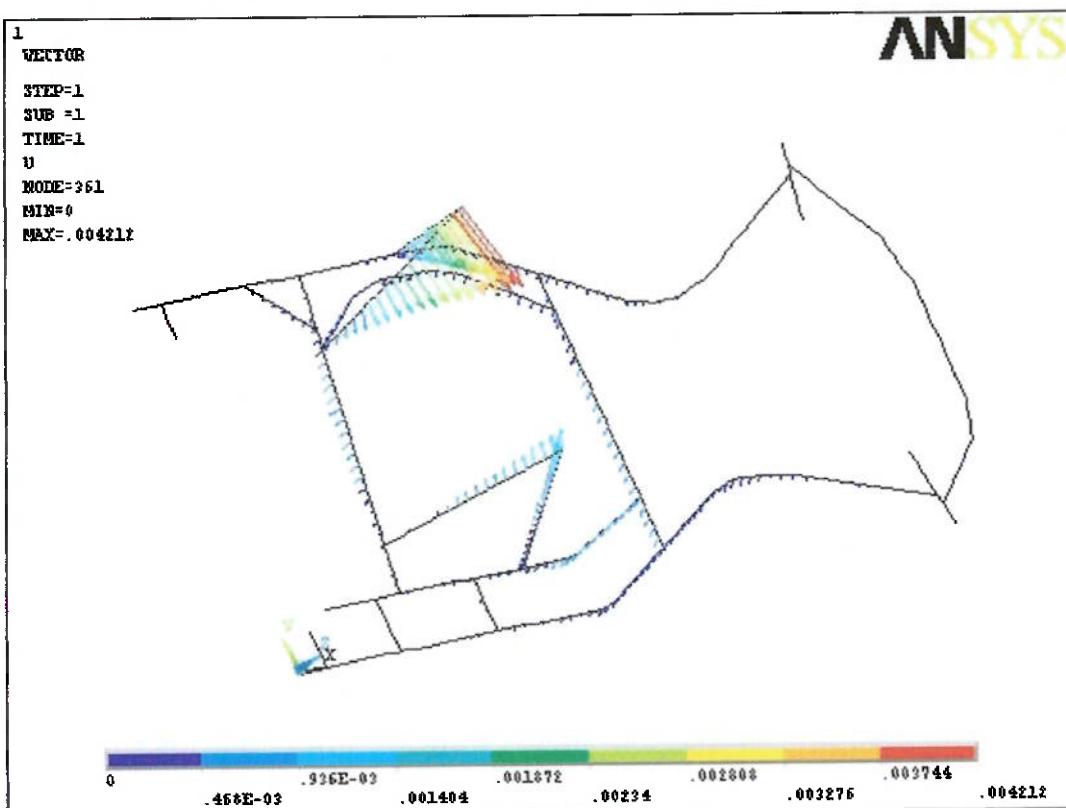


Figura 4.13 – Vetores de deslocamento dos nós da estrutura com a barra em nova posição

Com a modificação da posição das barras, há também redução no deslocamento máximo, mas não tão elevada como na primeira alternativa. No entanto, esse deslocamento máximo, da ordem de 4mm, assegura o perfeito funcionamento do kart, ainda mais se considerarmos novamente que os deslocamentos nos pontos de fixação do motor e do eixo são de, aproximadamente, 1mm.

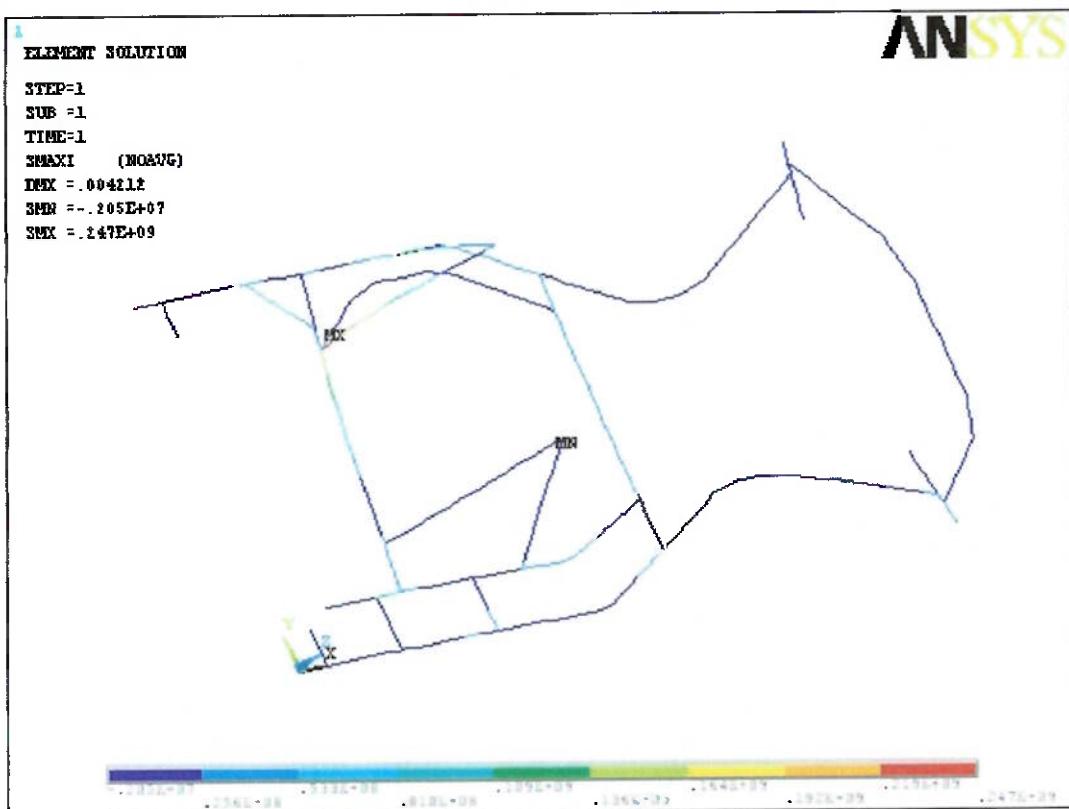


Figura 4.14 – Distribuição de tensões no chassis com uma novo posicionamento de barras

O valor da tensão máxima é aproximadamente 22% menor do que antes da alteração na posição da barra. Entretanto, essa redução torna não recomendável a utilização de um aço comum, pois os valores do coeficiente de segurança são muito próximos a 1. Torna-se então necessária, para este caso, a utilização de um aço de alta resistência.

Como este caso é viável com a utilização de um aço de alta resistência, é preferível que seja escolhido ao invés da primeira alternativa, visto que este terá uma massa menor, e por consequência, um melhor desempenho. Lembrando que o fator decisivo de compra é o desempenho e não o preço.

Todos os aços de alta resistência que foram selecionados anteriormente na tabela 3.3 podem ser utilizados na fabricação do kart, pois suas tensões de escoamento são bem mais elevadas do que o valor da tensão máxima na estrutura. Vale a pena ressaltar que a escolha de qualquer um desses aços não interfere no desempenho do kart, pois as deformações, os deslocamentos, as

distribuições de tensão e a massa só dependem de características comuns a todos os tipos de aço, como o módulo de Young e a densidade.

Já que todos esses aços atendem a necessidade, o critério de escolha do material passa a ser o preço do mesmo.

A tabela 4.1 mostra a relação de preço por kilograma para cada um dos tipos de aços em questão.

Tabela 4.1 – Preço x Tipo de aço

Aço	Preço (US\$/kg)
4130	1,60 – 2,00
4140	2,20 – 3,00
4340	2,80 – 3,50
8740	1,60 – 2,00

(fonte: Mannesmann)

Como pela tabela 4.1 os preços para os aços 4130 e 8740 são semelhantes, o critério de seleção torna-se a maior tensão de escoamento, portanto o aço a ser utilizado para a fabricação do chassis é o aço 8740.

5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Através dos requisitos de funcionalidade do chassis e das imposições tanto do Regulamento Nacional de Kart (RNK) como da fábrica Birel Sudam, chegou-se a uma estrutura básica. Foram então realizadas análises estruturais com a utilização de softwares baseados no método dos elementos finitos, a fim de verificar o comportamento dessa estrutura básica numa situação de solicitação extrema.

Ao fim das primeiras análises, constatou-se um ponto de elevada concentração de tensão, que deveria ser distribuída para o restante da estrutura. Duas propostas foram sugeridas, a adição de uma nova barra ou um novo posicionamento das barras.

Analizando a primeira situação, notou-se uma significativa queda no valor da máxima tensão, o que possibilitaria o uso de um aço comum e tornaria o produto mais barato, porém menos competitivo, devido ao aumento da massa do chassis. Para o mercado de competição, o fator de decisão na compra é o melhor desempenho e não o menor preço, então se o reposicionamento das barras fosse o suficiente para distribuir a concentração de tensão no ponto em questão, mesmo que fosse necessária a utilização de um aço de alta resistência, que tem um custo mais alto do que os aços comuns, a segunda proposta seria escolhida.

Durante a simulação da estrutura com o posicionamento das barras modificado, foi possível perceber uma redução de 22% no valor da máxima tensão, que é agora de 247MPa, e uma redução de 41% no máximo deslocamento, agora de 4,2mm. Essa condição torna o uso de um aço comum em algo não recomendável, já que os coeficientes de segurança para os mesmos ficariam muito próximos a 1.

Dentre os aços de alta resistência, todos poderiam ser usados na fabricação do chassis, considerando somente as suas tensões de escoamento, para efeito de obter um coeficiente de segurança razoável. Sendo assim, dentre estes foi escolhido o aço que tem a melhor relação entre custo e tensão de escoamento, que é o aço 8740.

A estrutura final fica conforme a figura 5.1, fabricada em aço SAE 8740 e com um coeficiente de segurança de 2,2.

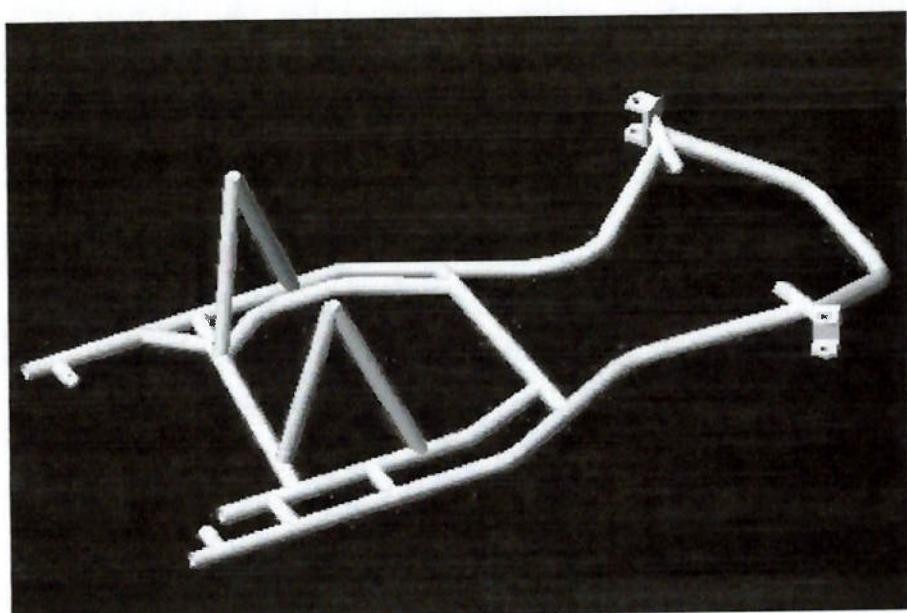


Figura 5.1 – Chassis final fabricado em aço SAE 8740

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GERE, J. M. **Mecânica dos Materiais**. 5th edition, Editora Thomson, São Paulo, 2003.
- KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2000.
- MatWeb – The Online Materials Information Resource
www.matweb.com
- Regulamento Nacional de Kart. Confederação Brasileira de Automobilismo, Rio de Janeiro, 2005.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C.R. Mechanical Engeneering Design. 5th edition, McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1989.