SIMULAÇÃO ESTRUTURAL E ANÁLISE DE FORÇAS DE UM CHASSI DE TRICÍCLO INVERTIDO

Victor Antônio Dias Pereira ⁽¹⁾ (victorpereira.ufsj@gmail.com), Gustavo Campos de Oliveira ⁽¹⁾ (gustavocamposdeoliveira@gmail.com), Sophia Diniz Milanez ⁽¹⁾ (milanezsophia@gmail.com), Tarsis Prado Barbosa ⁽²⁾ (tarsisbarbosa@ufsj.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ) – DEMEC - Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del Rei, MG

⁽²⁾ Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ) – DETEM - Rodovia MG-443, km 7, Ouro Branco, MG

RESUMO: Neste trabalho foi realizada uma análise estática estrutural de um chassi de triciclo invertido utilizando o método dos elementos finitos (MEF). O foco principal foi analisar as forças de maior magnitude que estavam presentes atuando na estrutura, como a força centrípeta em curvas e a força peso, relacionadas aos componentes embarcados e a massa do piloto. Além disso, foi feita uma análise de resistência mecânica avaliando as tensões que surgem mediante a combinação dos esforços sobre a estrutura e se essas tensões seriam suficientes para causar a falha da estrutura. A estrutura foi projetada utilizando uma liga de alumínio 6063 T5. O coeficiente de segurança obtido da simulação realizada foi de aproximadamente 2, indicando que o projeto realizado do chassi possui resistência suficiente para suportar os esforços. O chassi que foi fabricado seguindo o projeto desenvolvido e simulado também será apresentado.

PALAVRAS-CHAVE: triciclo, dinâmica veicular, análise estrutural, método dos elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

As competições universitárias nas diversas áreas de engenharia constituem uma das melhores formas de preparar os futuros engenheiros, proporcionando importante experiência de trabalho em equipe, exigindo desenvolvimento de projeto, planejamento na execução, determinação de prazos para realização de tarefas e outras vivências que serão levadas para a vida profissional. A Maratona de Eficiência Energética, realizada no Brasil desde o ano de 2004, é uma competição de veículos projetados para serem eficientes no aproveitamento da energia, possuindo três categorias (Righi, Costa e Molenda, 2010):

- Veículos que têm como fonte de energia um combustível fóssil – a gasolina;
- Veículos que utilizam um biocombustível – o etanol;
- Veículos que utilizam a energia química de baterias.

A proposta deste trabalho é estudar e construir o chassi de um veículo para competir na categoria de veículos a gasolina. Visando a melhoria da eficiência energética do projeto, o chassi ideal deve ser aquele com a menor massa possível, mas que resista aos esforços durante a movimentação do veículo e que tenha as especificações de segurança previstas no regulamento da competição. O projeto em questão visa contemplar esses três aspectos. Além disso, o processo de construção é todo realizado pelos alunos, sendo assim, o material escolhido deve ser de fácil manipulação, baixo custo e fácil de ser adquirido.

IX COEN – Congresso de Engenharias da UFSJ
Interconexão.

Para garantir que o veículo complete a prova é necessário conhecer as forças que atuam sobre ele durante o percurso. No projeto de qualquer estrutura ou máquina é necessário usar os princípios da estática para determinar as forças que agem sobre os vários elementos, bem como no seu interior (Hibbeler, 2015). O tamanho dos elementos, a sua deflexão e estabilidade dependem não só das cargas internas, mas também do tipo de material utilizado. Portanto, foi realizado um estudo da força centrípeta atuante sobre o veículo durante uma curva, que será responsável por gerar um momento sobre o chassi e também foi feita a avaliação da força peso atuando no centro de gravidade. Uma vez que se sabe a magnitude das forças que atuam sobre a estrutura, pode-se partir para a simulação do modelo computacional e estudo das tensões criadas, a fim de verificar se o projeto atende aos critérios de resistência.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os principais fatores que influenciam numa falha mecânica são as forças e momentos, que consequentemente geram tensões. É justamente o valor dessas tensões que devem ser mensurados e controlados para evitar que esses esforços venham a levar ao mal funcionamento ou a falha de componentes mecânicos. Quando um veículo percorre uma trajetória curva com um determinado raio (ρ) e com uma velocidade tangencial (v), irá surgir uma aceleração centrípeta (a_c) apontando para o centro da curva (Nicolazzi, 2001). Portanto, a magnitude dessa aceleração pode ser calculada da seguinte forma:

$$a_c = \frac{v^2}{\rho} \quad (1)$$

A força centrípeta (F_c) associada a massa (m) de um veículo é dada por:

$$F_c = a_c \cdot m \quad (2)$$

Substituindo (1) em (2):

$$F_c = \frac{v^2 \cdot m}{\rho} \quad (3)$$

Em uma análise estática, onde os componentes analisados estão em repouso, visto que o valor da aceleração é nulo, utilizando a segunda Lei de Newton para o cálculo das forças (F) e momentos (M) se verifica que:

$$\sum F = 0 \quad (4)$$

$$\sum M = 0 \quad (5)$$

As forças e momentos que atuam em diferentes direções no espaço irão criar tensões normais e cisalhantes. Considerando um elemento infinitesimal do chassi estudado, de forma genérica pode-se considerar o estado de tensão neste elemento dado por três tensões normais (na direção normal ao

plano de aplicação) e três tensões cisalhantes (paralelas ao plano de atuação), conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1: Estado triaxial de tensão.

Para fazer uma análise da resistência do chassi, será considerado o critério *de von Mises*. Este critério baseia-se na determinação da energia de distorção em um dado material, isto é, da energia associada a variações na forma do material. O conceito relacionado a este critério define que um componente estrutural está seguro desde que o valor máximo da energia de distorção por unidade de volume naquele material permaneça menor que a energia de distorção por unidade de volume necessária para atingir a tensão de escoamento do material. Uma vez que se atinge o valor da tensão de escoamento, as deformações no material já não são elásticas, mas sim plásticas e permanentes (Beer, 2011).

Uma estrutura ou componente que se deformou plasticamente, ou que sofreu uma mudança permanente na forma, pode não ser capaz de funcionar como planejado. Sendo assim, é preciso conhecer o nível de tensão no qual a deformação plástica tem seu início, ou onde ocorre o fenômeno de escoamento (Callister 2008). O valor da tensão de escoamento do material pode ser obtido em um ensaio de tração utilizando um corpo de prova fabricado com dimensões normalizadas (Beer, 2011).

Mediante o critério de *von Mises*, a tensão equivalente para um dado estado de tensão pode ser calculada por uma relação entre as tensões normais (σ) e cisalhantes (τ) mostradas na Figura 1, conforme mostrado abaixo:

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy} + \tau_{yz} + \tau_{zx}) \right]^{1/2} \quad (6)$$

Sendo assim, o critério de falha de Von Mises pode ser definido por:

$$\sigma' \leq S_y \quad (7)$$

Na Equação (7), S_y é a tensão de escoamento do material (*yield strength*). Uma vez que a tensão equivalente calculada não deve superar a tensão limite de escoamento do material, pode-se reescrever a desigualdade utilizando um coeficiente de segurança adimensional (n), conforme mostrado a seguir:

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \quad (8)$$

Portanto, para que não ocorra falha em uma determinada estrutura projetada, o valor do coeficiente de segurança mediante a Equação (8) deve ser maior que 1 (Budynas, 2016).

3. METODOLOGIA

3.1. Materiais

O modelo do chassi utilizado no projeto é conhecido como *Space Frame* ou chassi tubular. Sua construção foi feita com tubos de alumínio 6063 T5 com diâmetro de 1", 3/4" e 1/2" unidos por solda TIG. Essa liga de alumínio, apresenta boas propriedades de resistência mecânica e baixo peso, conforme os dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades do alumínio 6063-T5

Liga	Densidade (g/cm ³)	Limite de Escoamento (MPa)
Alumínio 6063-T5	2,7	145

De acordo com Budynas (2016), para estruturas soldadas, cujos elementos estão submetidos a carregamentos de flexão pode-se considerar um fator de segurança para os estudos próximo ao valor de 1,5 (Tabela 2). Portanto, este foi o valor adotado para a análise realizada.

Tabela 2: Tensões permitidas pela norma AISI para componentes metálicos soldados

Tipo de carregamento	Tipo de solda	Tensão permissível	n*
Tração	Topo	0,60 S_y	1,67
Suporte	Topo	0,90 S_y	1,11
Flexão	Topo	0,60-0,66 S_y	1,52-1,67
Compressão simples	Topo	0,60 S_y	1,67
Cisalhamento	Topo ou filete	0,30 S_y	

4.2. Análise Estrutural Utilizando o Método dos Elementos Finitos

Para a realização da simulação foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF), que se baseia em um procedimento para resolver um problema numérico fazendo a discretização do modelo com um conjunto de elementos infinitesimais. A ligação entre os vários elementos que constituem o modelo é feita por nós específicos do tipo de elemento utilizado (plano, trapezoidal, etc.). Em cada nó é definida uma equação para descrever os fenômenos de interesse do estudo. Logo, a solução do problema consiste em basicamente em encontrar a solução para o sistema de equações do modelo. O

computador utilizado para a realização das simulações foi um Acer Aspire com 8GB de memória RAM, processador Intel Celeron 1.4GHz, 64bits e sistema operacional Windows 10.

O veículo de interesse tem o formato de um triciclo invertido: duas rodas na frente e uma atrás. O sistema de direção é constituído por duas barras curtas que fazem a ligação do eixo do volante até ao bloco articulado de fixação dos mancais das rodas. Nenhuma das rodas possui sistema de suspensão, de forma que a análise pode ser simplificada considerando o chassi como um corpo rígido. A velocidade máxima do protótipo é de 40km/h e a velocidade média é inferior a 30km/h, o que também simplifica bastante os cálculos, fazendo-se desprezível a força de arrasto na análise estrutural, bem como das forças que surgem com ventos laterais. Além disso, o trajeto onde é realizado a competição é praticamente plano, logo, pode-se desprezar a componente da força peso relacionada a inclinação da pista.

De acordo com o regulamento da competição onde se pretende utilizar o veículo, a massa mínima do piloto deve ser de 50 kg. Portanto, foi considerado uma massa de 100 kg para a realização da simulação, já considerando o peso dos demais componentes que serão embarcados no veículo. O raio de curvatura considerado foi de 11 metros, que é o raio aproximado das curvas na competição, e a velocidade de realização das curvas foi considerada como 15km/h. Com base nestas informações, o valor de força centrípeta encontrado através da equação (3) é de aproximadamente 158N.

Também foi necessário determinar a posição do centro de gravidade (CG) do carro completamente montado e com o piloto, visto que é neste ponto que ocorre a atuação da força peso e da força centrípeta. O CG foi encontrado através do próprio software utilizando uma montagem do chassi com seus componentes e fazendo algumas aproximações: no lugar do motor foi colocado um bloco com um peso equivalente ao mesmo. O corpo do piloto também foi aproximado por formas geométricas com uma distribuição no carro semelhante ao do corpo e peso de uma pessoa. Além disso se definiu no programa que os assoalhos desenhados eram de madeira (Figura 2).

Figura 2: Montagem completa para localização do CG

4.3. Construção

Com base no modelo computacional criado foi possível obter as dimensões de todos os tubos de alumínio para se realizar o corte destes componentes de um tubo com comprimento inicial

de 6 metros. As partes curvas foram feitas usando um dobrador de tubos convencional com uma matriz circular com diâmetro de 500mm.

Figura 3: Estrutura do chassi tubular

Para fazer os encaixes dos tubos, em suas respectivas posições, foram utilizadas abraçadeiras e chapas finas de aço para fixação. Isso foi necessário para manter o chassi firme e estável para a realização do processo de soldagem.

Figura 4: Encaixe dos tubos antes da solda

5. RESULTADOS

5.1. Análise Estrutural

Sabendo as coordenadas do centro de gravidade, foi aplicado neste ponto as forças peso e força centrípeta no modelo computacional. As fixações utilizadas foram selecionadas nas barras responsáveis por apoiar os componentes de fixação das rodas e estão indicados por setas verdes na Figura 5. A distância das forças aplicadas ao CG em relação as fixações são a base para o cálculo dos momentos fletor e torçor que surgem na estrutura originando tensões normais e cisalhantes, respectivamente. A primeira análise feita considerou apenas a força centrípeta de 158N. Essa força foi aplicada no centro de gravidade do chassi, na direção paralela ao solo apontando para o centro da curva, conforme mostrado a Figura 5.

Figura 5: resultado da simulação de força centrípeta

Pode-se observar na escala das tensões obtidas pela simulação na Figura 5, que as tensões provocadas pela força centrípeta no chassi são muito pequenas, não ultrapassando 15MPa. Portanto, este tipo de solicitação na velocidade analisada, visto que o limite de escoamento do material é 145MPa, terá pouco efeito sob a estrutura projetada.

Foi feita também a simulação com o peso do carro e do piloto no chassi. O valor da força adicionada foi de 981N considerando um peso de 100 kg aplicado no CG, conforme mostrado na Figura 6. Pelos resultados dessa análise verificou-se que a força peso é a força que deve ser considerada na realização do triciclo e para a seleção de materiais para a estrutura. As partes amarelas na Figura 6 indicam os pontos de maior tensão que atingem valores máximos de 73,216MPa, que ainda assim estão a baixo do limite de escoamento do material, que é de 145,00MPa. Eventualmente, para se ter uma maior redução de peso da estrutura ainda poderia ter sido utilizado tubos de menor diâmetro.

Figura 6:Força peso no CG

Por fim, foi feito a análise dos valores do fator de segurança obtidos com base nas solicitações consideradas. A Figura 7 mostra a distribuição dos valores do fator de segurança ao longo da estrutura projetada.

Figura 7: Fator de segurança

O menor valor do fator de segurança obtido neste projeto está próximo de 2. Portanto, com base nos valores indicados por Budynas (2016) para este tipo de construção soldada, o projeto do chassi desenvolvido está apto para suportar os esforços, operando de forma segura apenas no regime elástico, onde as deformações provocadas pelas tensões não são permanentes.

5.2. Construção do chassi

Foi feita uma análise também de custo do chassi considerando a compra dos tubos e o valor da solda realizada por uma empresa terceirizada, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Custos de construção

Material/Serviço	Valor (R\$)	Quantidade	Total (R\$)
Tubo 1"	32,00 por metro	12	352,00
Tubo ¾"	28,00 por metro	3	84,00
Tubo ½"	22,00 por metro	1	22,00
Soldagem	2000,00	1	2000,00
Valor Final			2458,00

O maior custo envolvido no processo de fabricação do chassi está relacionado ao valor da mão de obra para realização da solda. O processo de soldagem exige experiência e paciência e em geral requer mais de um dia de trabalho. Para facilitar o processo de soldagem foi construído um gabarito de madeira para impedir o desalinhamento dos tubos devido ao aumento de temperatura do material e consequente dilatação térmica no processo. A Figura 8 mostra o chassi finalizado.

Figura 8: Chassi construído

6. CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho é estudar e construir o chassi de um veículo para competir na categoria de veículos a gasolina na *Shell Eco Marathon* Brasil. Foi projetado em um software computacional a estrutura de um triciclo invertido para ser construído em alumínio. Utilizando o método dos elementos finitos também se realizou uma análise estática estrutural para verificar as tensões que surgem na estrutura mediante a aplicação de uma força peso e da força centrípeta.

Com base nos valores obtidos de tensão para o modelo criado, a estrutura está apta para suportar os esforços, uma vez que o menor coeficiente de segurança obtido nas simulações foi de aproximadamente 2. Considerando que para este tipo de estrutura soldada o valor de segurança mínimo poderia ser de até 1,5, verificou-se que ainda seria possível reduzir a massa da estrutura reduzindo a quantidade de tubos e treliças no chassi e também os diâmetros utilizados.

A estrutura que foi projetada e simulada também foi construída, tendo sido gasto em torno de R\$ 2460,00 para a sua construção. O maior custo relacionado a construção da estrutura esteve relacionado ao custo da mão de obra terceirizada, visto que o processo de soldagem apesar de não ser complexo é demorado e requer a construção de gabaritos para garantir o perfeito posicionamento dos tubos do chassi em concordância com o projeto feito na ferramenta computacional.

7. DIREITOS AUTORAIS.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

8. REFERÊNCIAS

- BEER, F.P. Mecânica dos Materiais. 5. ed, Porto Alegre, 2011.
- BUDYNAS, R.G; NISBETT, J.K. Elementos de máquinas de Shigley. 10. ed, Porto Alegre, 2016.
- CALLISTER Jr., W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. Editora LTC, 7ª edição, 2008.
- HIBBELER, Russell Charles. Resistência dos materiais. 7.ed. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015.
- NICOLAZZI, L.C.; ROSA, E.; LEAL, L.C.M. Uma Introdução à modelagem quase estática de veículos automotores de rodas. GRANTE. Florianópolis. 2001
- RIGHI, L. A.; COSTA, L. H.; MOLEND, C. H. A. Projeto de veículo elétrico para competição de eficiência energética. Revista Tecnol, vol.07, n.01, p. 79-90, 2010.

STRUCTURAL SIMULATION AND ANALYSIS OF FORCES OF AN INVERTED TRICYCLE CHASSIS

Victor Antônio Dias Pereira ⁽¹⁾ (victorpereira.ufsj@gmail.com), Gustavo Campos de Oliveira ⁽¹⁾ (gustavocamposdeoliveira@gmail.com), Sophia Diniz Milanez ⁽¹⁾ (milanezsophia@gmail.com), Tarsis Prado Barbosa ⁽²⁾ (tarsisbarbosa@ufsj.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ) – Departamento de Engenharia Mecânica - Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del Rei, MG

⁽²⁾ Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ) – Departamento das Engenharias de Telecomunicações e Mecatrônica - Rodovia MG-443, km 7, Ouro Branco, MG

ABSTRACT: *In this work, a static structural analysis of an inverted tricycle chassis was carried out using the finite element method (MEF). The main focus was to analyse the forces of greater magnitude that were present acting in the structure, such as the centripetal force in curves and the force weight, related to the*

components embarked and the mass of the pilot. In addition, a mechanical strength analysis was performed evaluating the stresses arising by combining the stresses on the structure and whether these stresses would be sufficient to cause the structure to fail. The structure was designed using a 6063 T5 aluminium alloy. The safety coefficient obtained from the simulation was approximately 2, indicating that the design of the chassis has sufficient strength to withstand the stresses. The chassis that was manufactured following the developed and simulated design will also be presented.

KEYWORDS: *tricycle, vehicular dynamics, chassis, centripetal force.*