

<https://eventos.utfpr.edu.br/sei/sei2020>

Desenvolvimento e análise de rigidez de um chassi para veículo Fórmula SAE elétrico

Development and stiffness analysis of an electric Formula SAE vehicle

RESUMO

Eduardo Augusto Lohmann Daló
eduardodaló@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Ponta Grossa, Paraná,
Brasil

Frederic Conrad Janzen
fcjanzen@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Ponta Grossa, Paraná,
Brasil

Jader Tavares Lima
jadertlima@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Ponta Grossa, Paraná,
Brasil

Este trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada em uma área de chassi de uma equipe de Fórmula SAE Elétrico, que demonstra os principais procedimentos para o projeto de um chassi tubular. Os objetivos são a redução de peso, a facilidade de adequação com os demais subsistemas e a alta rigidez. Nele será possível entender quais os principais inputs para modelar e dimensionar um projeto de chassi, sua ligação com o regulamento da competição SAE, abordando a importância da ergonomia do piloto, a otimização de espaço e a adequação de posicionamentos dos demais subsistemas. Além disso, são relatadas as decisões e resultados obtidos, como, materiais utilizados, tipos de tubos com suas espessuras e validação estrutural da rigidez torcional do chassi utilizando o Método dos Elementos Finitos.

PALAVRAS-CHAVE: Método dos elementos finitos. Análise estrutural (Engenharia). Veículos elétricos.

ABSTRACT

This work aims to present the methodology used in a chassis area of an Electric Formula SAE team, that demonstrates the main procedures for the design of a tubular chassis. The goals are to reduce weight, ease of adaptation to other subsystems and high stiffness. It will be possible to understand the main inputs needed to model and dimension a chassis project, its connection with the SAE competition regulations, approaching the importance of the pilot's ergonomics, the space optimization and the adequacy of the subsystems position. In addition, the decisions and results obtained are reported, such as materials to be used, types of tubes with their thickness and structural validation of the torsional stiffness of the chassis using the finite element method.

KEYWORDS: Finite element method. Structural analysis (Engineering). Electric vehicles.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um projeto e análise de rigidez torcional em um chassi de modelo tubular. O qual, além de estar presente na maioria dos automóveis atuais, é utilizado em um carro de competição modelo SAE com o simples objetivo de interligar e sustentar todos os subsistemas do carro sem que nenhum quebre ou se desprenda durante a utilização do veículo. Destaca-se a importância dos demais subsistemas do carro para o projeto, os quais são completamente essenciais para o desenvolvimento dos espaços internos, design dos tubos e posicionamentos, o que está relatado de maneira detalhada neste artigo.

Além disso, será possível compreender também a importância da validação de parâmetros ao longo do desenvolvimento do projeto, tais como: restrições de regulamento, impostas pela SAE, além de simulações em software a fim de obter resultados sobre a rigidez torcional do chassi.

MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto completo do chassi tem como principal objetivo o baixo peso e alta rigidez. O projeto foi desenvolvido no *software* SolidWorks, que permite elaborar o desenho 3D do chassi e seus componentes, além de realizar a ligação com os demais subsistemas em uma montagem.

Como dito anteriormente, muitas referências são definidas pelos demais projetos que serão acoplados no chassi posteriormente, então, é essencial que haja uma compatibilidade do projeto do chassi com os outros projetos. Assim, para que o desenho do chassi seja iniciado é preciso de três *inputs*: o projeto do banco/ergonomia com o gabarito de piloto cujas medidas são fornecidas no regulamento e representa a posição do piloto no banco; o projeto da suspensão, que irá fornecer a posição dos *pick-up points*, que são os locais de fixação dos braços de suspensão; e o projeto do *pedal box*, que determina o espaço que os pedais irão ocupar dentro do chassi. Para realizar o primeiro protótipo do chassi, a estrutura é dividida em três partes: frontal, central e traseira, sendo que, entre essas três partes existem dois tubos chamados de arcos. O arco frontal interliga a parte frontal com a parte central do chassi, e o arco principal faz a ligação central com a parte traseira do chassi.

As primeiras medidas mais importantes a serem definidas são a distância do arco principal até o arco frontal e a distância até o anteparo frontal, que é o tubo mais à frente do chassi. Essas medidas são definidas de acordo com o posicionamento do banco com o gabarito do piloto, já que esse determina a distância mínima que deve haver de espaço para o piloto quando o carro estiver pronto. Com a distância do arco principal até a extremidade do gabarito e a distância dos pedais até o anteparo frontal é possível obter o tamanho, em comprimento, da parte central e frontal da estrutura.

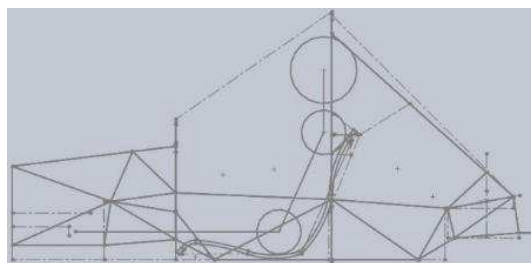
Quanto ao espaço, para defini-lo entre o arco principal e o *jacking point* (último tubo do chassi na parte traseira), leva-se em consideração o tamanho do *pack* de baterias, sendo ele posicionado rente ao arco principal, o motor, posicionado atrás do *pack* com um pequeno espaço para evitar superaquecimento e, em seguida, a transmissão com o diferencial. Com isso, é possível determinar o comprimento total do chassi. Em seguida, é feito o posicionamento dos *pick-up points*. A partir desses pontos fornecidos pelo subsistema de suspensão, é possível

determinar a geometria da tubulação nas laterais do carro, já que um dos objetivos do projeto é que todos esses pontos estejam ligados no chassi exatamente nos nós (pontos onde os tubos se interligam) para obter uma melhor distribuição de forças no chassi. Após determinar a geometria lateral do posicionamento dos pontos de suspensão, é feita a ligação entre todos os principais pontos do chassi, isto inclui as curvas, dobras, quinas e extremidades dos tubos.

Para determinar a largura do chassi são consideradas algumas distâncias estabelecidas por gabaritos de ergonomia demonstrados na Figura (1), os quais devem adentrar verticalmente na parte do meio do chassi e outro horizontalmente na parte frontal até próximo aos pedais, as medidas de ambos são disponibilizadas no regulamento. Além disso, a largura do banco e do *pack* de baterias também influenciam para determinar a largura da parte traseira do chassi. Com os gabaritos, banco, *pack*, motor e transmissão posicionados, é possível obter a distância de entre-eixos, bitola dianteira e bitola traseira.

Por fim, para determinar a altura dos três principais tubos do chassi - o arco frontal, o arco principal e o anteparo frontal - foram utilizadas duas restrições estabelecidas pelo regulamento, sendo elas uma distância de, no mínimo, 50 mm entre o capacete do piloto e a linha que interliga o topo dos arcos frontal e principal. Além disso, o anteparo frontal que sustenta o atenuador de impacto, estrutura usada para desacelerar o veículo gradualmente durante uma colisão frontal de impacto, deve obedecer a uma distância mínima da borda do atenuador até a borda interna do tubo do anteparo frontal, esta que deve ser de no máximo 25 mm, sem que necessite de demais tubos para sua sustentação.

Figura 1 – Chassi em linhas com gabarito de piloto



Fonte: Autoria própria (2020).

Após a finalização do desenho 3D em linhas, é preciso definir quais serão as espessuras de tubo utilizadas na estrutura. Para isso, relações de restrição são estabelecidas pelo regulamento para diferentes tubos ao longo do chassi, como: material, diâmetro mínimo, espessura mínima, momento de inércia da área mínima e área de seção transversal mínima.

De acordo com Miliken (1995), ao desenvolver uma estrutura de um chassi para um carro de corrida, duas propriedades assumem grande importância na rigidez da estrutura, são elas: a rigidez à flexão e a rigidez à torção. No entanto, uma vez que um chassi apresenta uma rigidez à flexão suficiente, a rigidez à torção também será satisfatória.

Segundo Riley e George (2002), a estrutura do chassi pode ser comparada ao comportamento de uma mola em torção, conectando a suspensão frontal à suspensão traseira conforme a Figura (2). A partir dessa hipótese, a rigidez torcional pode ser representada da seguinte forma:

$$K_t = \frac{T}{\theta} \quad (1)$$

Onde:

K = Rigidez torcional

T = Torque

θ = Deflexão angular média

O torque (T) pode ser representado da seguinte forma:

$$T = 2FL \quad (2)$$

Onde:

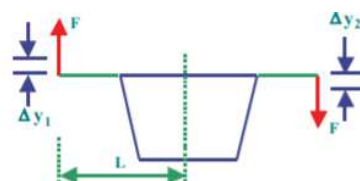
F = Força vertical atuante na roda

L = Metade do comprimento da bitola do veículo

A deflexão angular média (θ) pode ser representada da seguinte forma:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2L} \quad (3)$$

Figura 2 – Desenho esquemático de torção



Fonte: Riley e George (2002).

Para medir os deslocamentos da estrutura, é utilizada uma abordagem numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos em uma simulação estática no software Ansys, o desenho CAD simplificado no *software* SpaceClaim. A estrutura é modelada como elementos de viga para simplificar o cálculo.

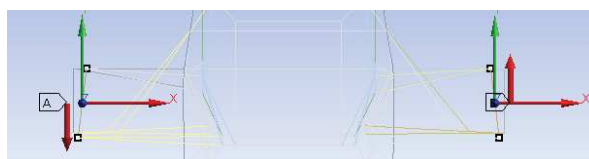
Avaliar a rigidez torcional segue um princípio básico de fixar uma extremidade do chassi e aplicar um carregamento na outra extremidade com a finalidade de gerar uma rotação e medi-la (Sampò, 2011). Assim, é fixada a parte traseira do chassi utilizando apoio simples nos nós conforme a Figura (3). Em seguida, são aplicadas forças nas posições das rodas frontais através do recurso forças remotas, gerando um momento de binário na estrutura conforme a Figura (4).

Figura 3 – Local dos apoios



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 4 – Momento de binário



Fonte: Autoria própria (2020).

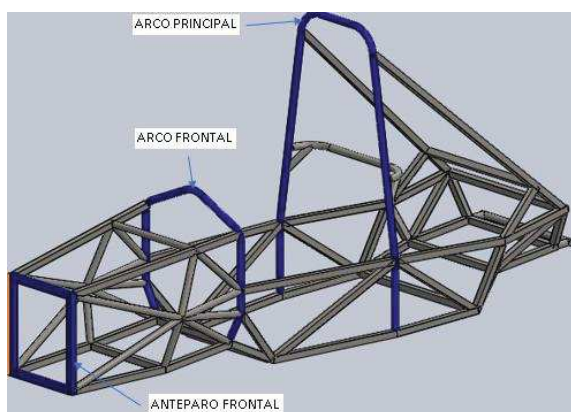
As medições dos deslocamentos verticais da estrutura são realizadas no próprio software para aplicação na Eq. (3). As conexões entre as bandejas de suspensão e o chassi são modeladas como juntas esféricas e o valor de bitola utilizado foi 1273,24 mm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao todo, três tipos de tubos são definidos para o chassi, tubo redondo com 25,4 mm de diâmetro e 2,5 mm de espessura, tubo redondo com 25,4 mm de diâmetro e 1,2 mm de espessura e tubo quadrado com 25x25 mm e 1,2 mm de espessura. Os tubos estão representados na Figura (5), as medidas dos arcos estão contidas na Tabela (1) e na Tabela (2).

Conhecidas as dimensões mínimas dos tubos, é elaborada uma matriz de decisão para selecionar o material mais viável para a sua fabricação, os pontos levantados para esta decisão são: custo, acessibilidade no mercado, facilidade de manuseio e peso. Feita a análise, o material selecionado foi aço carbono 1020.

Figura 5 – Chassi com tubos



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 1 – Dimensões dos arcos

Tubos Principais	Altura(mm)	Largura da base(mm)
Arco principal	1100	625
Arco frontal	527	405
Anteparo frontal	380	330

Fonte: Autoria própria (2020).

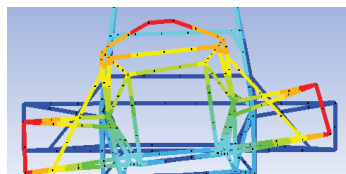
Tabela 2 – Distâncias entre os arcos

Intervalos	Distâncias(mm)
Arco principal – Arco frontal	700
Arco frontal – Anteparo frontal	736
Arco principal – <i>Jacking point</i>	918

Fonte: Autoria própria (2020).

Ao realizar a simulação de rigidez torcional obtém-se o deslocamento total da estrutura, conforme a Figura (6).

Figura 6 – Deslocamento total



Fonte: Autoria própria (2020).

Além disso, obtém-se os valores de deslocamento vertical da bandeja frontal direita (Figura (7) e Tabela (3)) e do conjunto de bandeja frontal esquerdo (Figura (8) e Tabela (4)).

Figura 7 – Deslocamento vertical do conjunto direito



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 3 – Deslocamentos verticais do lado direito frontal

Força(N)	Deslocamento Vertical(mm)
200	-27,2510
500	-18,1670
1000	-9,0835
1500	-3,6334

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 8 – Deslocamento vertical do conjunto direito



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 4 – Deslocamentos verticais do lado esquerdo frontal

Força(N)	Deslocamento Vertical(mm)
200	27,2470
500	18,1650
1000	9,0825
1500	3,6330

Fonte: Autoria própria (2020).

Ao aplicar os valores encontrados na Eq. (1), obtém-se os seguintes resultados para a constante de rigidez torcional:

Tabela 5 – Valores encontrados de rigidez torcional

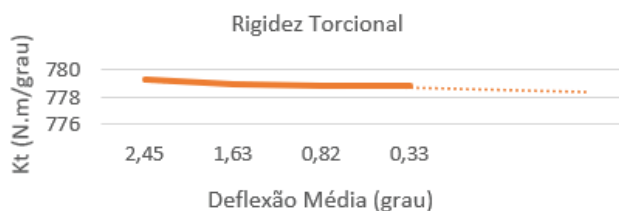
Força(N)	Kt(Nm/grau)
200	779,24
500	778,98

Força(N)	Kt(Nm/grau)
1000	778,82
1500	778,78

Fonte: Autoria própria (2020).

Conclui-se então uma média de rigidez torcional de 778,96 Nm/grau e a linha de tendência contida na Figura (9).

Figura 9 – Linha de tendência de rigidez torcional



Fonte: Autoria própria (2020).

Pode-se entender então que a rigidez torcional encontrada está em um intervalo que, segundo Sampò (2011), é satisfatório para esta aplicação.

Tabela 6 – Valores indicativos de rigidez torcional de diferentes veículos

Veículo	Kt(Nm/grau)
Carro Fórmula SAE	300 - 3000
Carro de Passageiro	5000 - 25000
Carro de corrida <i>Winston Cup</i>	15000 - 30000
Carro esporte	5000 - 50000
Carro de Fórmula Um	5000 - 10000

Fonte: Adaptado de Sampò (2011).

CONCLUSÃO

Através deste trabalho foi possível compreender o processo de projeto e análise estrutural de um chassi tubular com base em dados de ergonomia, restrições regulamentares impostas pela fórmula SAE e posicionamentos de subsistemas que interferem no design e comportamento dinâmico do veículo. Foi possível compreender também a metodologia utilizada para a análise estrutural do chassi e interpretar os resultados obtidos, que estão dentro do esperado para a categoria, mas ainda possui margem para desenvolvimento. Para uma alteração estrutural mais precisa a fim de aumentar a rigidez torcional será necessário realizar testes com o protótipo para obter dados sobre o comportamento do veículo em pista e a influência de rigidez do chassi na dinâmica do carro. Por fim, espera-se que este trabalho seja de grande valia para o desenvolvimento deste e dos futuros protótipos a serem projetados e construídos pela equipe.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e à Pró-Reitoria de Relações Empresariais e Comunitárias pela infraestrutura e pelos recursos disponibilizados para realizar esta pesquisa e a equipe UForce F-SAE e-Racing por todo o aprendizado e oportunidades proporcionados.

REFERÊNCIAS

FSAE. *Formula SAE Rules 2020*. [S.l.], 2019. Disponível em: <http://fsaeonline.com/cdsweb/gen/downloaddocument.aspx?documentid=d9fa3638-59f8-411c-a487-e27abc2d9022>. Acesso em: 04 ago. 2020.

MILLIKEN, W.F., MILLIKEN, D.L., **Race Car Vehicle Dynamics**, Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1995.

RILEY, W.B., GEORGE, A.R., **Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis**, Motorsports Engineering Conference and Exhibition, 2002-01-3300, Indianapolis, Indiana, December 2-5, 2002.

SAMPÒ, Enrico; SORNITTI, Aldo; CROCOMBE, Andrew. Chassis Torsional Stiffness: Analysis of the Influence on Vehicle Dynamics. In: CONGRESS 2010 SAE Canada, Survey. Chassis Torsional Stiffness. Survey: SAE Paper 2010-01-0094, 2010.

SAMPÒ, Enrico; SORNITTI, Aldo; CROCOMBE, Andrew. Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy - University of Surrey - Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2011. Modelling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation, 2011.