



PROJETO E ANÁLISE ESTÁTICA DE CHASSI PARA UM PROTÓTIPO AUTOMOTIVO DE PEQUENO PORTE

Anderson Ericksson Bonness¹
Antônio Flávio Aires Rodrigues²
Luiz Carlos Gertz²

Resumo: Este trabalho apresenta o projeto de um chassi tubular para um protótipo automotivo de pequeno porte. Inicialmente foram desenhadas as partes que compõem o veículo, como sistema de suspensão, transmissão, direção e posteriormente foi desenhado um chassi para receber estas partes, sempre buscando uma boa relação de massa e rigidez torcional. O chassi foi submetido a uma análise estrutural estática através do Método de Elementos Finitos (MEF) com o uso do programa ANSYS Workbench. Foi realizada análise estática que permitiu calcular a rigidez torcional. A melhor relação obtida foi um chassi com massa de 45,5 kg e rigidez torcional de 477,19 Nm/°, utilizando tubos de aço SAE 4130 (cromo/molibdênio) com seção circular de 1.3/8” e parede de 2,25 mm e um coeficiente de segurança estrutural de 1,23.

Palavras-chave: chassi tubular, rigidez torcional, análise estrutural.

Abstract: This work presents the design of a tubular chassis for a small automotive prototype. Initially the parts that make up the vehicle were designed, as a suspension, transmission, steering system and later a chassis was designed to receive these parts, always looking for a good mass ratio and torsional rigidity. The chassis was subjected to a static structural analysis using the Finite Element Method (MEF) using the ANSYS Workbench program. Static analysis was performed to calculate torsional stiffness. The best ratio obtained was a chassis with a mass of 45.5 kg and torsional stiffness of 477.19 Nm / °, using SAE 4130 steel tubes (chrome / molybdenum) with 1.3/8” circular section and 2.25 wall mm and a structural safety factor of 1.23

Keywords: tubular chassis, torsional stiffness, structural analysis.

Introdução

A principal estrutura de um veículo é o chassi, pois é nele que são montados todos os sistemas mecânicos como suspensão, sistema de transmissão e de direção, entre outros. As forças atuantes na área de contato dos pneus com o solo geram solicitações que causam efeitos de tração, compressão e torção no chassi.

Existem diversos tipos de chassis, os principais são o *ladder*, monobloco, monocoque e tubular. O objetivo deste trabalho foi projetar um chassi tubular para um protótipo automotivo de pequeno porte com boa relação entre massa e rigidez

¹ Acadêmico do Curso de engenharia Mecânica Automotiva/ULBRA

² Docente do Curso de engenharia Mecânica Automotiva/ULBRA
(antonio.rodrigues@ulbra.br; luiz.gertz@ulbra.br)

torcional utilizando o Método de Elementos Finitos. A seleção do chassi do tipo tubular se justifica por ser um dos mais adequados para produção em pequena escala, além de ter baixo custo de fabricação, processo de fabricação simples e apresentar boa rigidez torcional. Sua fabricação é baseada na soldagem manual de tubos e perfis. Todas as solicitações e cargas são aplicadas no chassi tubular e sua carroceria não tem função estrutural.

Para determinar uma solução aproximada de problemas de engenharia, se utiliza de um modelamento numérico chamado de Método de Elementos Finitos (MEF). O método subdivide o domínio de um problema em partes menores que consiste na técnica de geração de malha para dividir um problema complexo.

Malha é o processo de discretização em um número limitado de elementos unidos em pontos chamado de nós ou pontos nodais. Esse conjunto de elementos e nós presentes em uma geometria é chamado de malha. Isso significa que se decompõem uma geometria em n partes a fim de se obter algum fenômeno em determinada região, que porventura possa existir. Para verificar a interdependência dos resultados em relação ao tamanho de malha, pode-se adotar o procedimento de ir refinando a malha até que a tensão obtida na análise da estrutura tenha variações insignificantes. Testando assim se a solução obtida converge para a solução exata do problema. Segundo Rodrigues et al. (2015) este tipo de análise impõe a estrutura restrições e cargas conhecidas, a fim de determinar o deslocamento e tensões, que servem de parâmetro para verificar a resistência do material usado na construção e se necessita de alterações na geometria, espessura ou material.

Para Rodrigues et al. (2015), a técnica mais apropriada para medir a qualidade de uma estrutura é através da rigidez torcional que é obtida a partir dos deslocamentos da estrutura quando submetida a cargas estáticas. De acordo Thompson, Lampert e Law (1998) para avaliar a rigidez torcional do chassi utiliza-se o método de restringir o movimento de translação e rotação na parte traseira do veículo e na parte dianteira do chassi é aplicado um carregamento no ponto onde é fixado o componente de amortecimento da suspensão dianteira. Essa força é aplicada em ambos os lados, mas com sentidos opostos, gerando assim um torque puro na estrutura. Na tabela 1 pode ser visto alguns valores de rigidez encontrados para diversos tipos de veículos.

Tabela 1 – Parâmetros de rigidez torcional

Veículos	Rigidez torcional [Nm/grau]
Fórmula SAE	300 - 3000
Carros de passeio	5000-25000
Nascar	15000-30000
Carros esportivos	5000-50000
Fórmula 1	5000-10000

Fonte: Adaptado Milliken (1995)

A torção de um chassi veicular deve ser considerada muito relevante no projeto. Quando essa força não está prevista no projeto e no coeficiente de segurança, existe a possibilidade de gerar-se tensões acima do suportado pela estrutura, causando comprometimento do chassi.

Materiais e Método

Definição dos parâmetros de projeto como bitola, entre eixos e massa total do chassi

Para o projeto deste veículo definiram-se alguns dados de entrada. O chassi deve ser projetado a partir destes dados, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de entrada do projeto

DADOS DE ENTRADA DO PROJETO	
Bitola	1180 mm
Largura total	1360 mm
Distância entre eixos	1800 mm
Distância centro da roda até o solo	255 mm
Diâmetro da roda	510 mm
Massa total esperada do veículo	200 kg
Massa total esperada do chassi	50 kg
Massa do piloto	70 kg
Altura total do piloto	1700 mm
Motor e tração traseiro	

Desenho do chassi em CAD (computer-aided design) através de superfícies médias

O desenho do chassi foi realizado no programa SolidWorks em Sketch 3D e utilizando superfícies médias da espessura do tubo conforme Figura 1. O desenho do chassi em CAD deve seguir os parâmetros de projeto já pré-estabelecidos conforme Tabela 2. Após é realizado uma análise inicial do chassi onde se verifica os principais pontos de concentração de tensão e deslocamento, e se retorna com o desenho do projeto para o CAD a fim de alterar a geometria e melhorar o chassi.

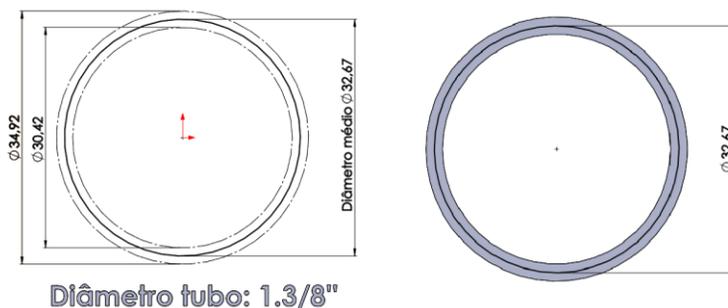


Figura 1: Representação da superfície média do tubo em CAD

Nesse processo também são observados os tubos que não estão recebendo esforços ou tenham uma função estrutural para que possam ser removidos da estrutura com o objetivo de reduzir a massa do chassi, para obter-se a melhor relação massa e rigidez torcional.

Definição do tipo de material a ser utilizado no projeto

Para a construção do chassi optou-se por tubos de seção circular de aço SAE 4130, liga de cromo molibdênio com diâmetro externo 34,92 mm (1.3/8”) e parede 2,25 mm. As propriedades do material a serem utilizadas na construção do chassi estão dispostas na Tabela 3. Para a união dos tubos na construção do chassi, deve ser realizada solda do tipo MIG (*Metal Inert Gas*).

Tabela 3 – Propriedades do material SAE 4130

AÇO SAE 4130		
Propriedades	VALOR	UNIDADE
Massa Específica	7850	kg/m ³
Módulo de Elasticidade	190	GPa
Resistência a Tração	668,8	MPa
Tensão de Escoamento	436,4	MPa
Coefficiente de Poisson	0,29	

Fonte: Adaptado Gall e Boyer (1985).

Geração da malha no programa de elementos finitos Ansys

Para iniciar o processo de análise no ANSYS, é necessário importar a geometria para o programa e utilizar o sistema de análise *Static Structural*. Realizada essa etapa, é necessário selecionar o material para a estrutura no programa e configurar com as suas propriedades do material conforme dados informados pelo fornecedor do material SAE 4130, conforme tabela 3. Nessa etapa também é

informado a parede do tubo, que nesse estudo é de 2,25 mm.

Após a etapa de definição do material no software, é iniciado o processo de geração da malha na estrutura. Para o estudo foi utilizado o método de placas e cascas bidimensionais a fim de diminuir o tempo computacional de processamento conforme indicado na literatura nesse tipo de análise, gerando assim uma malha com elemento triangular de três nós, conforme pode ser visto na Figura 2.

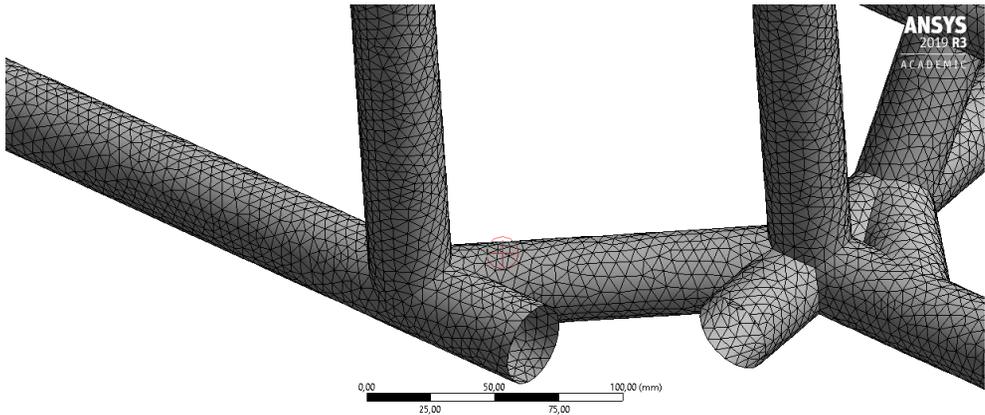


Figura 2: Distribuição da malha no chassis

A fim de estabelecer um critério de independência de malha foi utilizado o critério da máxima tensão de von Mises entre refinamentos. A diferença final de tensão foi estabelecida em 1% entre as tensões, como pode ser visto na Figura 3.

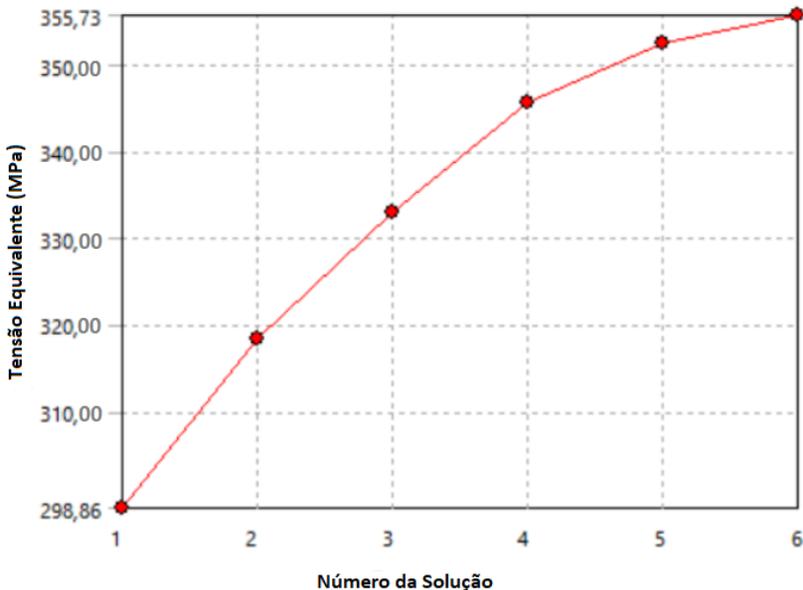


Figura 3: Critério de independência de malha

Aplicar condições de contorno no modelo, como restrições e cargas

Para realizar a análise estática é necessário submeter a estrutura a algumas condições de contorno, como restrição e cargas para gerar um torque puro na estrutura e determinar os deslocamentos e tensões no chassi, a fim de que se possa analisar o comportamento estático da estrutura.

Para a realização desse estudo foi utilizado o método conforme Thompson, Lampert e Law (1998), que consiste em fixar o chassi na traseira, restringindo o seu movimento. A traseira do chassi é fixada no ponto onde é instalado o componente de amortecimento da suspensão, o qual o conceito, nesse projeto, trata-se de suspensão do tipo duplo A com amortecedor no centro entre as balanças inferior e superior. Os pontos que representam os mesmos do componente de amortecimento, onde foi fixado o chassi na análise, pode ser visto na Figura 4.

B: Malha 5 mm
Fixed Support 4
Time: 1, s
17/02/2021 11:02

A Fixed Support
B Fixed Support 2
C Fixed Support 3
D Fixed Support 4

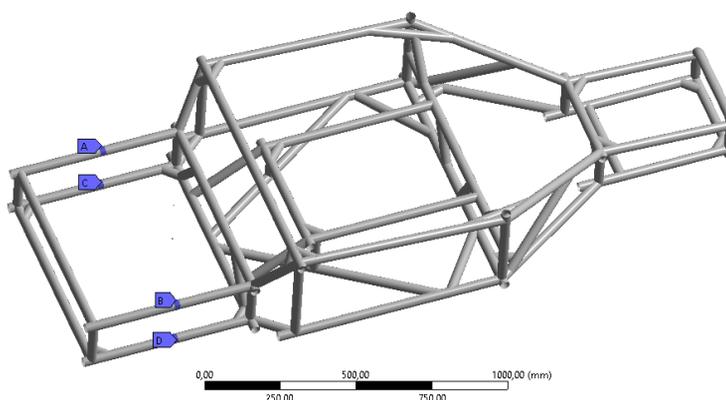


Figura 4: Pontos de fixação do chassi

Na sequência conforme a Figura 5, utilizam-se duas forças com sentidos contrários na dianteira, e estas forças são aplicadas no ponto onde é fixado o componente de amortecimento. Para esse chassi esse ponto na dianteira é entre as duas balanças da suspensão, conforme está representado na Figura 5. Também é necessário criar um ponto de apoio no centro da linha de aplicação das forças, podendo ser visto na Figura 5 como os pontos C e D e na Figura 6 como ponto P.

B: Malha 5 m m
 Displacement 2
 Time: 1, s
 17/02/2021 11:06

A Force: 2649, N
 B Force 2: 2649, N
 C Displacement
 D Displacement 2

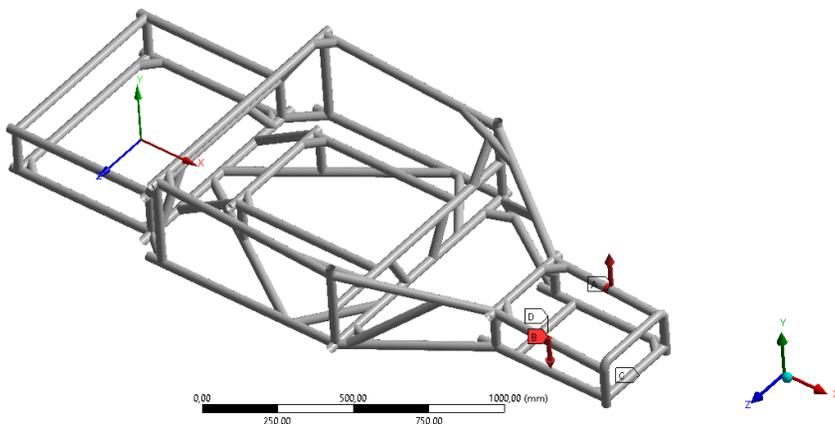


Figura 5: Aplicação das forças e apoios no chassi

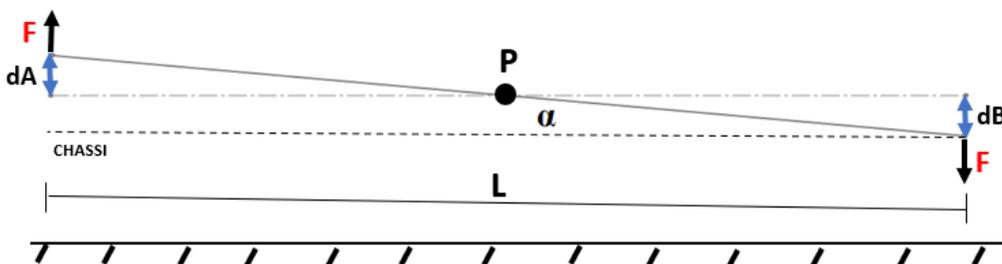


Figura 6: Representação das condições de contorno para análise

Onde,

F são as forças aplicadas em ambos os lados com sentidos opostos.

dA e dB são os deslocamentos em cada ponto.

α é o ângulo formado entre o deslocamento dA e dB com o comprimento L.

A força aplicada em cada um dos lados nesse estudo foi de 2649 N e está relacionado com a massa total do veículo e do piloto.

Resultados e Discussão

Rigidez torcional

Projetar o chassi para um determinado veículo com a menor massa possível e atendendo a rigidez torcional necessária da estrutura foi objeto deste estudo. A massa do chassi está relacionada com a escolha do material (massa específica). Levando em consideração o custo, disponibilidade de bitolas no mercado e rigidez torcional da estrutura, optou-se para este projeto tubos de aço SAE 4130. As propriedades

do material estão dispostas na Tabela 3. Definido o material a ser utilizado no programa ANSYS a massa total do chassi ficou de aproximadamente 45,5 kg.

Para avaliar a análise estática, foi realizada a verificação da rigidez torcional do chassi, seguindo os procedimentos de restrição da traseira e aplicação da carga em sentidos opostos na dianteira. Com o sistema de análise do ANSYS *Static Structural* foi então avaliado o deslocamento, encontrando um deslocamento total de 4,96 mm, que possibilita calcular o ângulo de torção da estrutura (Figura 7). Relacionando com o torque aplicado, obteve-se a rigidez torcional (K_T) da estrutura.

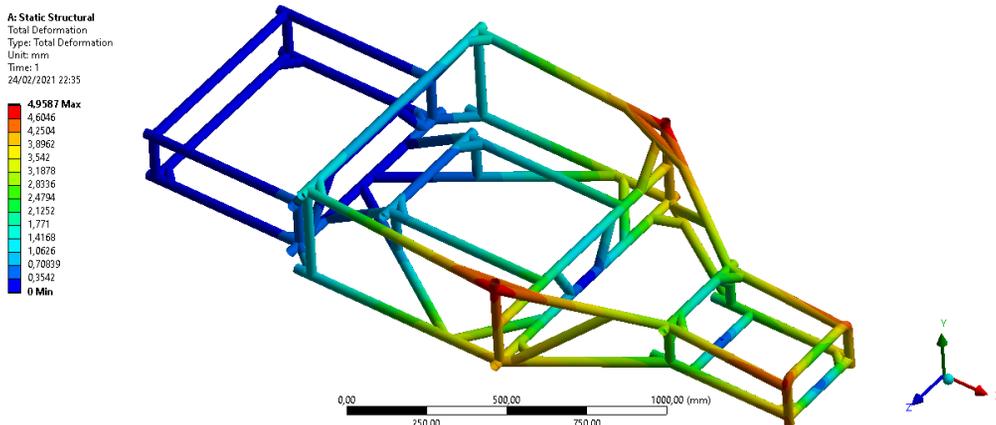


Figura 7: Deslocamento total do chassi

Para calcular a rigidez torcional, foi reunido na Tabela 4 as principais informações do projeto e condições de contorno que envolvem a análise.

Tabela 4 – Principais informações para cálculo da rigidez torcional

Força(F)	2649	N
Distância de Aplicação da Forças (L)	0,32	m
Deslocamento (D)	0,00496	m

Para se obter o torque aplicado na estrutura utiliza-se a equação 1.

$$T = 2 * F * \frac{L}{2} \quad \text{eq. (1)}$$

$$T = 847,68 \text{ N}$$

Sendo:

T é torque na estrutura.

L é a distância entre as cargas forças aplicadas.

F é a força aplicado na estrutura.

Tendo o valor de torque aplicado na estrutura, através da equação 2 obtém-se o ângulo de torção da estrutura.

$$\begin{aligned}\varnothing &= \left(\sin^{-1} \left(\frac{2 * D}{L} \right) \right) && \text{eq. (2)} \\ \varnothing &= 1,7764^\circ\end{aligned}$$

Sendo:

\varnothing é o ângulo de torção calculado.

D é o deslocamento vertical no ponto de aplicação da carga.

Com os dados de torque aplicado na estrutura e ângulo de torção calculado com o deslocamento da estrutura é possível relacionar torque por ângulo de torção na equação 3 e obter a rigidez torcional da estrutura.

$$\begin{aligned}K_T &= \frac{T}{\varnothing} && \text{eq.(3)} \\ K_T &= 477,19 \text{ Nm/}^\circ\end{aligned}$$

Sendo:

K_T é a rigidez torcional

Para se obter rigidez torcional do chassi foi fixado a traseira e aplicado uma força na dianteira de 2649 N em ambos os lados com sentidos opostos no ponto de fixação do componente de amortecimento. Gerando assim um deslocamento máximo da estrutura de 4,96 mm conforme figura 6, com esse valor foi calculado o ângulo de torção da estrutura de 1,78°. Sendo assim possível calcular através da equação 3 a rigidez torcional da estrutura, com resultado de 477,19 Nm/°.

Com o valor da rigidez torcional sendo de 477,19 Nm/° para o chassi foi preciso consultar a tabela 1 para verificar se o valor de rigidez torcional encontrado está de acordo com a faixa de rigidez aceitável para o modelo. Como a proposta desse veículo é para transportar apenas um ocupante e a massa total do chassi é inferior ao disposto em algumas normas, o chassi se enquadra nos requisitos da categoria Fórmula SAE, onde a rigidez deve ser de 300 á 3000 Nm/°.

Esse valor de rigidez torcional encontrado está aceitável de acordo com a tabela 1 considerando que o veículo projetado se encaixa na categoria Fórmula SAE, para um ocupante.

Tensões na estrutura e coeficiente de segurança

Foi realizado uma análise estática de tensões para se verificar se o material selecionado para a estrutura do chassi vai resistir as tensões estáticas aplicadas sobre o chassi, para isso na mesma análise *Static Structural* foi inserido o Método de Tensão

Equivalente de von Mises, que é a distribuição de tensões da estrutura.

Através da análise estática foi verificado a distribuição e concentrações de tensão na estrutura como poder ser visto na Figura 8. Verificaram-se os pontos de concentração de tensão e a tensão máxima da estrutura foi de 355,73 MPa, sendo a tensão de escoamento do material 436,4 MPa.

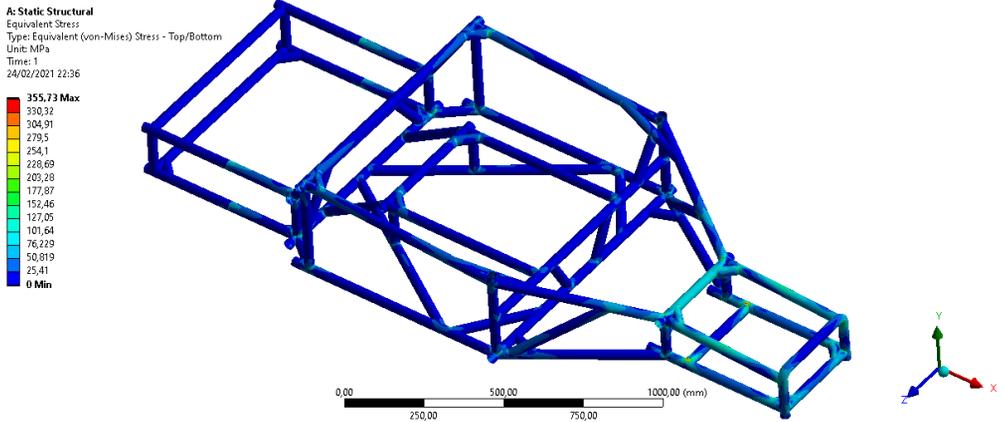


Figura 8: Concentração de tensões na estrutura

Para garantir que a estrutura não entre em colapso por falha estrutural do material, é necessário que a máxima concentração de tensões seja menor do que a tensão de limite de escoamento do material, conforme equação 4.

$$\sigma_{\text{von Mises}} \leq \sigma_e \quad \text{eq. (4)}$$

Com os valores de tensão máxima da estrutura e tensão de escoamento do material é possível calcular o coeficiente de segurança da estrutura através da equação 5.

$$S = \frac{\sigma_e}{\sigma_{\text{von Mises}}} \quad \text{eq.(5)}$$

$$S = 1,2367$$

Onde,

S é coeficiente de segurança da estrutura.

σ_e é a tensão de escoamento do material.

$\sigma_{\text{von Mises}}$ é a distribuição de tensões na estrutura (von Mises).

Utilizando a equação 5 obteve-se o coeficiente de segurança para o projeto do chassi de 1,23 estando de acordo com os critérios de resistência dos materiais,

conforme relação A.

Para verificar o resultado do coeficiente de segurança calculado na equação 5, optou-se por realizar uma análise de tensões da estrutura no programa ANSYS que calculou o coeficiente da estrutura e o resultado foi um coeficiente mínimo de 1,23 como pode ser visto na Figura 9. O valor encontrado por o programa está de acordo com o coeficiente calculado na equação 5.

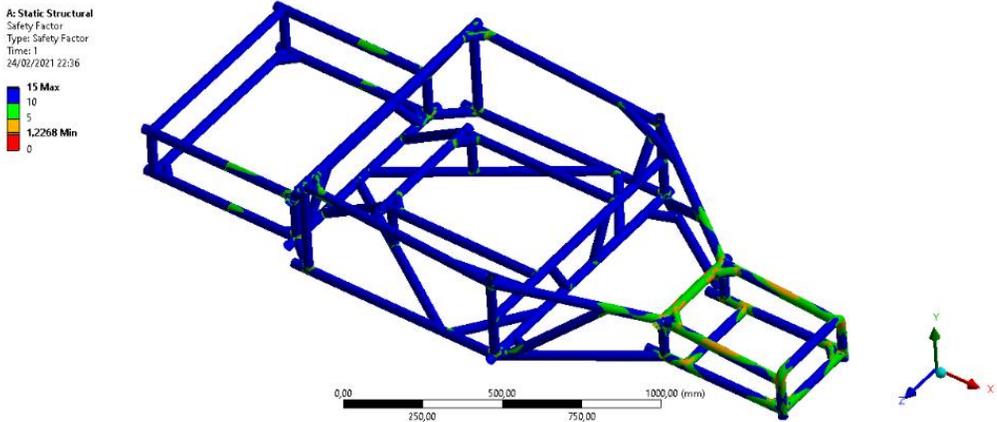


Figura 9: Coeficiente de segurança ANSYS

Conclusão

A análise estática do chassi mostrou que o chassi tem uma rigidez torcional de $477,19 \text{ Nm/}^\circ$, estando assim de acordo com as normas construtivas para esse tipo de chassi. Esse valor de rigidez torcional promove um comportamento adequado ao chassi quando submetido a cargas torção.

Mesmo com o tratamento da malha e adequação do desenho estrutural do chassi o modelo apresentou pontos de concentração de tensão indesejáveis na estrutura. Porém, a maior concentração de tensão do chassi foi de $355,73 \text{ MPa}$, estando abaixo do limite da tensão de escoamento do material. Portanto, o coeficiente de segurança do projeto estrutural do chassi é de 1,23, sendo satisfatório para os critérios de resistência dos materiais.

A melhor relação entre massa e rigidez torcional obtida para o chassi, levando em consideração a disponibilidade de matéria prima com as seções de tubos para o projeto, formato construtivo preservando pontos para fixação dos demais componentes do veículo e carregamentos que o veículo pode ser submetido, foi uma massa total do chassi de $45,5 \text{ kg}$ e rigidez torcional de $477,19 \text{ Nm/}^\circ$, utilizando tubos aço carbono SAE 4130 e seção circular de $1.3/8''$ com parede $2,25 \text{ mm}$.

A análise estática da estrutura é fundamental para o desenvolvimento do projeto. Pois o programa permite analisar a massa total do chassi e comparar com a

rigidez torcional. Com isso é possível modificar a estrutura afim de obter um projeto mais adequado.

Referências

ADAMS, H., **Chassis Engineering: Chassis Design, Building & Tuning for High Performance Handling**. New York: HP Books,1993.

ALVES FILHO, A., **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2000.

ANSYS Inc.(R), Structural Analysis Software Solutions. www.ansys.com, 2021.

GALL, T. L.; BOYER, H. E. **American Society for Metals, Metals Handbook: Desk Edition**. 2th edition. Ohio: Metals Park, 1985.

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

RODRIGUES A. F. A. *et al.*, Static and Dynamic Analysis of a Chassis of a Prototype Car. São Paulo: **SAE Technical Paper Series 2015-36-0353**, 2015.

SOLIDWORKS (Dassault Systèmes). www.solidworks.com, 2021.

THOMPSON, L. L.; LAMPERT, J. K.; LAW, E. H., Design of a Twist Fixture to Measure Torsional Stiffness of a Winston Cup Chassis. Warrendale, PA: **SAE Technical Paper Series 983054**, 1998.

THOMPSON, L.L; RAJU, S.; LAW, E. H., Design of a Winston Cup Chassis for Torsional Stiffness. Warrendale, PA: **SAE Tecnical Paper Series 983053**, 1998.