

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

ESTUDO COMPARATIVO DE RIGIDEZ TORCIONAL DE UM CHASSI SPACE FRAME DO TIPO BAJA SAE

Emanuel Francisco Nogueira de Queiroz¹ – emanuelqueiroz.eng@gmail.com

Arlindo Pires Lopes¹ – alopes@uea.edu.br

Adriana Alencar Santos¹ – drica.eng@gmail.com

Pedro Henrique Ferreira Guimarães¹ – pedro_hfg@hotmail.com

Jéssica Adriane Campelo Guimarães¹ – jessicacampeloguimaraes@gmail.com

Gilda Gabrielly Souza de Andrade¹ – gildaandrade123@gmail.com

Hilnner Leal Tavares Farias¹ – hltf.eng17@uea.edu.br

¹ Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia – Manaus, AM, Brasil

Resumo. *Este trabalho simula as condições de esforços torcionais na dianteira de um protótipo Baja SAE durante a passagem por terrenos acidentados, avaliando a rigidez torcional da estrutura e otimizando seus pontos críticos. No método de análise, a modelagem da geometria foi realizada no software Autodesk Inventor® e a modelagem matemática no software Ansys®. Preparando a análise, foram aplicados os parâmetros da malha em elementos finitos bem como as cargas torcionais e as condições de contorno, na estrutura original e em uma outra versão com a adição de elementos treliçados. Como resultados, a rigidez da estrutura modificada atingiu um ganho de 69,84%, no valor de 1169,2 N.m^o, aceitável dentro da literatura, bem como as frequências naturais aumentaram 5,21%, mostrando o estudo modal como outra alternativa de complementar o estudo de rigidez.*

Palavras-chave: Baja; rigidez torcional; chassi; vibrações; elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

Na competição Baja SAE, desafios de projeto e construção de um veículo automotivo para todos os tipos de terrenos são propostos aos estudantes de engenharia, de modo que o protótipo seja confiável, sustentável, ergonômico e que atenda ao público entusiasta.

Diversas instituições de Ensino Superior participam da competição com o intuito de expandir os conhecimentos teóricos e práticos, junto com as habilidades em desenvolvimento de projetos.

A competição consiste em duas etapas, que são as avaliações estáticas e dinâmicas. As estáticas consistem na Inspeção Técnica de Segurança, realizada pelo comitê da SAE Brasil, para averiguar a conformidade dos veículos com relação aos regulamentos, e na Avaliação de Projeto, que qualifica o desenvolvimento teórico e conceitual do protótipo. Já as avaliações

dinâmicas, consistem na avaliação de Conforto, que realiza a análise de ergonomia e dirigibilidade, na avaliação de Segurança Dinâmica, que testa as condições do veículo para a frenagem e passagem por obstáculos acentuados, e na avaliação de “Endurance”, que submete o veículo a testes extremos em terrenos irregulares.

Durante o deslocamento deste tipo de veículo perante obstáculos difíceis como troncos, buracos e lama, o chassi deve possuir a rigidez adequada para um trabalho harmonioso do sistema de suspensão, de forma que o chassi suporte o estresse gerado pelos amortecedores, ou seja, sem que haja deformações no próprio durante o trabalho da suspensão.

Este estudo contempla a avaliação da rigidez torcional de um chassi tubular do tipo Baja SAE quando submetido a cargas críticas, através de simulação computacional, de modo a desenvolver uma metodologia capaz de avaliar o comportamento da gaiola de proteção perante a aplicação de esforços torcionais, propondo otimizações adotando métodos alternativos para amplificar a rigidez da estrutura, caso necessário.

Os resultados foram analisados verificando se uma possível intervenção na geometria da estrutura poderia acarretar no aumento da rigidez. Além disso, foram calculadas as frequências naturais da estrutura com o objetivo de analisar o seu comportamento durante a otimização da geometria. Por fim, comparou-se a relação entre as novas frequências naturais da estrutura junto ao aumento da rigidez do chassi.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Chassi de um protótipo Baja

O chassi é uma estrutura utilizada em veículo automotor cujas funções são sustentar, acoplar e proteger os seus subsistemas e a pessoa que for utilizar o veículo. Além disso, ele é o responsável por dar resistência e estabilidade ao veículo em qualquer situação. Pelos motivos citados anteriormente, o chassi é comumente comparado a um esqueleto e é considerado um dos componentes mais significativos de um automóvel (CHANDRA et al, 2012).

Dentre os vários tipos de chassi, temos o “space frame”, uma estrutura com elementos treliçados, ou seja, com geometrias triangulares. Essa configuração é utilizada em veículos tipo Baja, e confere ao veículo uma alta rigidez torcional, quando submetido a diversos tipos de carregamentos além de alta resistência à flexão (HAPPIAN-SMITH et al, 2002).

Suas características baseiam-se em sua geometria espacial na qual ocorre a transmissão das cargas de flexão e torção aplicadas no chassi através de esforços de tração e compressão ao longo dos nós ou uniões de elementos. Além disso, sua geometria permite redução significativa da massa do veículo por se tratar de elementos tubulares, contribuindo assim para o desenvolvimento de seu desempenho dinâmico.

A aplicação do space frame não se restringe somente ao automobilismo, mas também a estruturas rígidas como pontes, estádios, aeroportos, edifícios e outros. O space frame é geralmente projetado com uma matriz de rigidez, e pode ser definido tanto por elementos simples como tubos quanto por elementos rígidos como treliças. O custo de fabricação deste modelo geralmente é mais barato que os demais por conta de ser fabricado com componentes mais simples. Porém, a complexidade da fabricação de um space frame pode variar desde a estrutura treliçada mais simples até a mais complexa.

2.2 Rigidez torcional

Enquanto a rigidez diz respeito à flexão, a rigidez torcional trata-se da resistência à torção que o veículo possui, este sendo um dos pontos críticos do projeto de um chassi. O estudo desta rigidez é de suma importância em diversas áreas da engenharia, pois esta determina o comportamento de uma estrutura ao sofrer esforços e como isso afeta os diversos subsistemas que estão ao redor.

Analogamente pode-se considerar o chassi como sendo uma mola, portanto segundo Halliday et al (2012), utiliza-se a equação da deformação em um corpo elástico, também conhecida como Lei de Hooke e ainda de acordo com Law (1998), através de um aprofundamento de princípios de mecânica dos sólidos e realizando-se algumas simplificações, um método pode ser desenvolvido para determinar uma rigidez torcional aproximada para chassis. Se o torque (T) é relacionado ao ângulo de torção do chassi (φ) da mesma forma que a Lei de Hooke, conforme Eq. (1):

$$K_T = \frac{T}{\varphi} \quad (1)$$

Onde K_T é o coeficiente de rigidez torcional na unidade N.m/°.

Dentre os métodos existentes para a determinação da rigidez torcional, todos partem de um mesmo princípio básico, que consiste na fixação de uma extremidade do chassi e na aplicação de um momento torçor na outra extremidade, de tal forma que a torção do chassi ocorra e seja medida (SAMPÔ, 2011).

As condições de contorno da estrutura consistem na restrição de todos os graus de liberdade dos pontos de fixação da suspensão em uma das extremidades do veículo (dianteira ou traseira), isto é, nas fixações dos braços de suspensão e dos amortecedores da mesma.

De forma análoga, os pontos de aplicação do momento torçor podem ser determinados como os pontos de fixação dos amortecedores. Deste modo, a fim de mensurar a rigidez e ao mesmo tempo averiguar as deformações da estrutura durante esforços críticos, converte-se o momento torçor em cargas binárias com mesma direção e sentidos opostos, adotando-se a carga do binário como a força máxima que o amortecedor utilizado suporta, conforme Fig. 1.

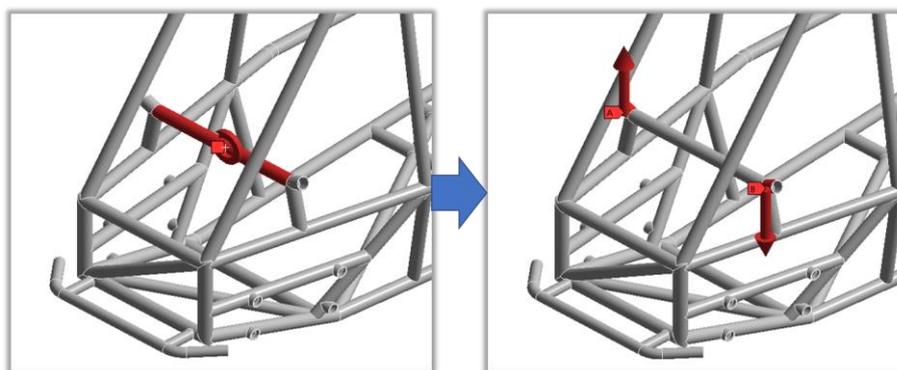


Figura 1 - Representação do momento torçor em cargas binárias.

Utilizando-se a constante de rigidez e o alongamento máximo do amortecedor, ambos fornecidos pelo fabricante do amortecedor, pode-se determinar a força máxima exercida pelo mesmo sobre o chassi através da aplicação da Lei de Hooke representada na Eq. (2).

$$F = K \cdot x \quad (2)$$

Onde F é a força exercida (em N), K é constante de rigidez (em N/m) e x é o deslocamento linear (em m).

Tal medida pode ser aplicada tanto para a medição da rigidez torcional dianteira quanto traseira do chassi, variando apenas qual extremidade será restrita e qual será submetida à esforços torcionais. Ao fim, por meio da determinação destas pode-se determinar a rigidez torcional média da estrutura.

Sabendo que, o torque, T (em N.m), é representado pela força vertical aplicada aos pontos de montagem, F (em N), a distância dos pontos ao plano médio do chassi em vista frontal, B (em m) e que a deflexão angular (em grau) é baseada na deflexão vertical dos pontos de montagem da suspensão, bem como da distância ao plano médio do chassi, tem-se a Eq. (3).

$$K_T = \frac{T}{\varphi} = \frac{F \cdot B}{\varphi} \quad (3)$$

Então, partindo do princípio que o torque é uma função do ângulo de torção, podemos assumir, segundo Tebby (2011), que a rigidez torcional é descrita seguindo-se uma curva linear em que a rigidez pode ser precisamente determinada como a inclinação da função. Esta tendência é conhecida como linearização da rigidez torcional, exemplificada na Fig. 2.

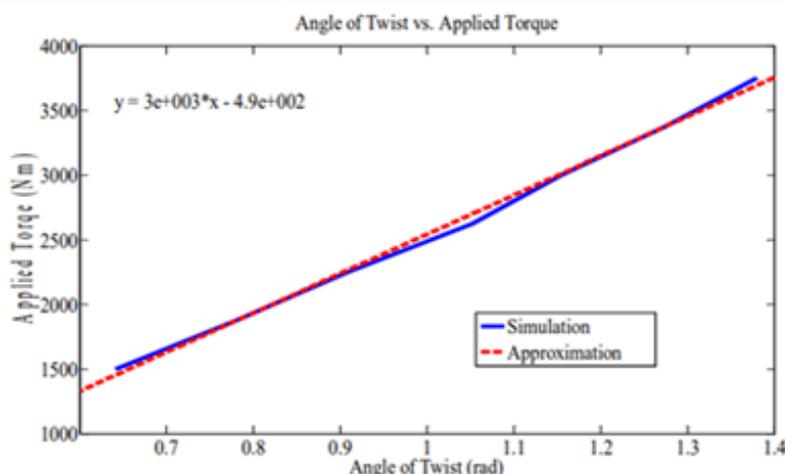


Figura 2 – Gráfico de linearização da rigidez torcional.

A Tabela 1 possui dados de alguns exemplos de rigidez torcional aceitáveis em diversas categorias de automóveis. É válido ressaltar que dependendo do autor ou fonte, os valores podem variar, e por isso optou-se por manter os valores agrupados em faixas.

Tabela 1 – Rigidez torcional por tipos de veículos.

Veículo	Rigidez Torcional (N.m/grau)
Baja SAE*	750 – 1.500
Fórmula SAE	1.000 – 5.000
Carros de Passeio	5.000 – 25.000
Carros de corrida Nascar	15.000 – 30.000
Carros esportivos	15.000 – 40.000
Fórmula 1	10.000 – 100.000

Fonte: *BARBOSA, 2015; SAMPÒ, 2010.

Como já dito, o chassi possui resistências a flexão e à torção, porém esta primeira não é tratada com a mesma relevância que a segunda. Existem alguns motivos para a diferença na urgência de tratamento destas resistências. O motivo principal que resume a maioria destes é que, segundo Milliken e Milliken (1995), se o chassi tiver uma boa rigidez torcional, por consequência, este será também resistente a flexão.

Ainda de acordo com Milliken e Milliken (1995), a predição da dirigibilidade só é possível se o chassi for suficientemente rígido para que o ângulo de rolagem entre as massas suspensas e as não suspensas seja causado somente pela suspensão, isto é, uma baixa rigidez torcional ira ocasionar problemas na dirigibilidade do veículo, além de outros problemas como exemplificado por Sampò (2011), fechamento de portas prejudicado, vibrações e falta de controle nos pneus.

2.3 Frequência natural

Em todas as áreas das Engenharias, existem diversos tipos de elementos de sustentação físicos que abrangem diversos sistemas. A treliça é uma das estruturas frequentemente utilizadas na indústria por possuir propriedades notáveis, como vibrações cíclicas com poucas frequências naturais dominantes, ressonância e modos naturais de vibração.

O fenômeno da ressonância consiste na coincidência da frequência natural da estrutura com alguma frequência de excitação externa. De acordo com Rao (2008), caso isto ocorra, haverá a amplificação das vibrações da estrutura, e esta amplificação pode causar falhas por fadiga resultantes da variação cíclica do estresse induzido no chassi.

A fim de prevenir os efeitos devastadores que podem ser causados pela vibração nas estruturas, são averiguadas as possíveis soluções para reduzir as vibrações através do design adequado ou pela montagem, assim como, aumentando sua rigidez ou mudando sua massa.

Para garantir a segurança dos componentes, a frequência natural do chassi deve ser maior que qualquer frequência de excitação gerada durante o trajeto do veículo, evitando de forma definitiva a ressonância do sistema.

Não é possível afirmar que uma estrutura irá entrar em colapso caso a frequência de excitação coincida com a frequência natural. Segundo Rao (2008), a única conclusão imediata possível, caso isto ocorra, é que haverá a amplificação das vibrações da estrutura, e esta amplificação pode causar alguns tipos de falhas como: por ruptura, por fadiga ou por ruído.

A partir da análise do chassi, é possível observar a existência de frequências naturais dos elementos, entre elas as frequências de translação e rotação da estrutura, em seguida, as frequências fundamentais dos elementos. A frequência é definida através da Eq. (4).

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4)$$

Onde ω é a frequência natural (em Hz), K é a constante de rigidez (em N/m) e m é a massa do corpo (em kg).

A partir disto, podemos prever que para uma massa constante, como o caso do chassi, existirão maiores frequências para maiores constantes de rigidez.

Estas são detalhadamente trabalhadas, afim de evitar que os elementos do chassi entrem em ressonância com algum outro elemento externo, como o motor ou com outro tubo. A ressonância amplifica as vibrações levando o equipamento a falhas prematuras.

3. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

O modelo computacional utilizado na simulação é projetado no software Autodesk Inventor, de acordo com as normas da SAE Brasil, vigentes em 2017. Trata-se de um chassi que é composto pelo material com as especificações da Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações e propriedades do material

Nome do material	Aço SAE 1020
Módulo de Elasticidade	205 GPa
Limite de Escoamento	350 MPa
Dimensões dos tubos	Ø31.75 x 1.6 mm; Ø25.4 x 1.2mm

Fonte: Autoria própria.

A geometria em questão é modelada no software Autodesk Inventor® e exportada para o Ansys®, software a ser utilizado para as análises estruturais pelo método dos elementos finitos, e a partir daí definem-se as propriedades da malha de elementos. O tipo de elemento adotado para a malha é o tetraédrico, visto que de acordo com sua distribuição em elementos de baixa espessura, atua de maneira uniforme, isto é, sem grandes distorções nos elementos e nos resultados. Na Fig. 3 pode-se visualizar a malha e a sua distribuição.

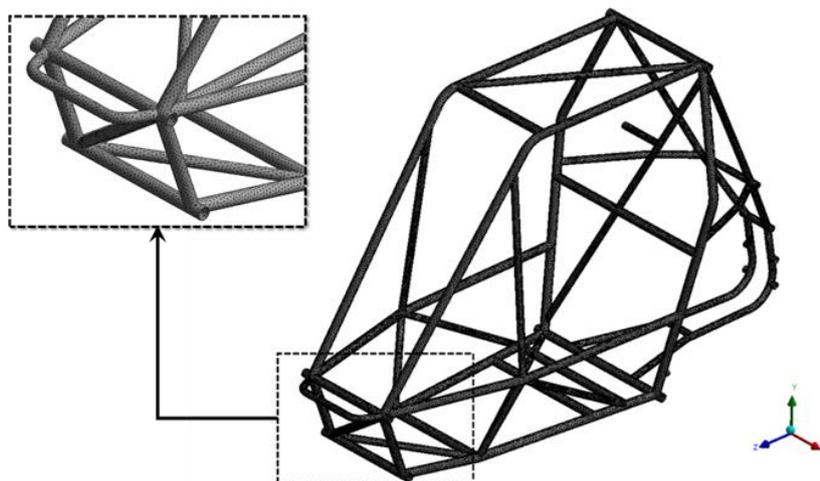


Figura 3 – Discretização da malha tetraédrica em elementos finitos.

Para o modelo em questão, busca-se determinar a rigidez torcional da estrutura através de uma análise estrutural estática. A fim de garantir a objetividade da mesma, preparou-se a simulação para a obtenção da rigidez torcional dianteira, isto é, com a aplicação das restrições na traseira e do momento torçor na dianteira, visto que durante as competições de Baja, a dianteira recebe mais esforços torcionais que a traseira do veículo durante a ultrapassagem de obstáculos.

Selecionando-se como exemplo da análise o amortecedor Yamaha XT 660R - modelo comumente utilizado em motos e veículos fora de estrada -, através da rigidez 67.000 N/m e do alongamento máximo de 108,5 mm, ambos os parâmetros fornecidos pelo fabricante, determina-se a sua carga máxima no valor de 7.270 N, a qual será aplicada nos pontos de fixação dos amortecedores dianteiros. Além disso, realiza-se também a restrição de todos os graus de liberdade dos pontos de fixação da suspensão traseira. As cargas e restrições são exibidas na Fig. 4.

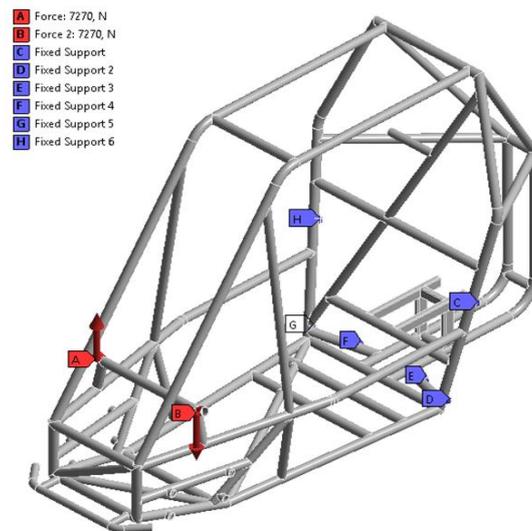


Figura 4 – Carregamentos e condições de contorno do modelo matemático.

Para a determinação do deslocamento angular da estrutura após a aplicação do momento, utilizam-se na escolha do pós-processamento, isto é, dos resultados, os deslocamentos direcionais dos elementos finitos da estrutura. Estes resultados fornecerão os deslocamentos de todos os nós da malha nos eixos cartesianos (x , y e z), definindo-se assim, através de simplificações algébricas, o deslocamento angular de todos os pontos com relação ao eixo longitudinal do chassi, como visto na Fig. 5.

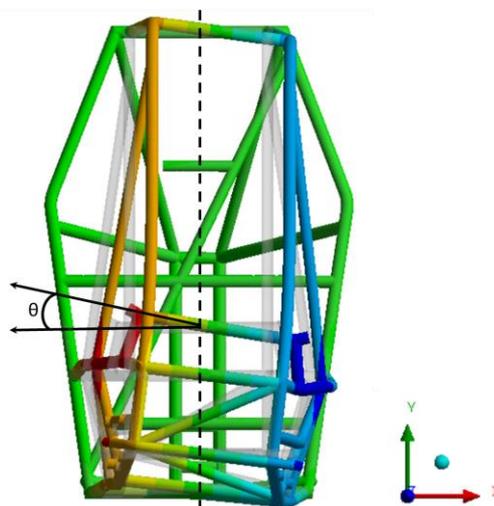


Figura 5 – Representação do deslocamento angular de um ponto do chassi na vista frontal.

Como a definição da rigidez torcional depende da sua linearização, escolhem-se dois pontos do chassi para a projeção da reta. O primeiro ponto adotado é a fixação direita do amortecedor dianteiro cuja carga é aplicada com direção para o eixo y positivo, enquanto o segundo ponto é a própria origem do chassi (localizado atrás do piloto), onde o momento de torção e o deslocamento angular são nulos. Na Fig. 6 os pontos são representados no modelo.

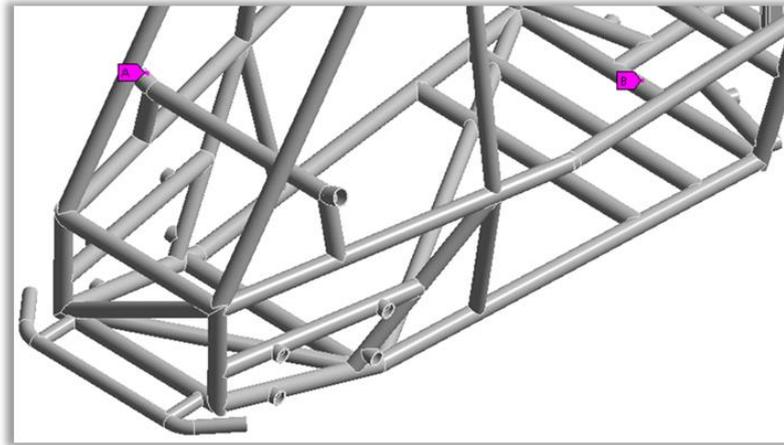


Figura 6 – Ponto de análise do amortecedor (A) e da origem do modelo (B).

Após a simulação, realizam-se algumas modificações na geometria da dianteira do veículo com o intuito de verificar o aumento da rigidez, mantendo-se os pontos de suspensão nas mesmas localizações e adicionando elementos treliçados nas laterais e no teto. Na Fig. 7 os elementos adicionados são definidos pela cor azul, enquanto os modificados são definidos pela cor vermelha.

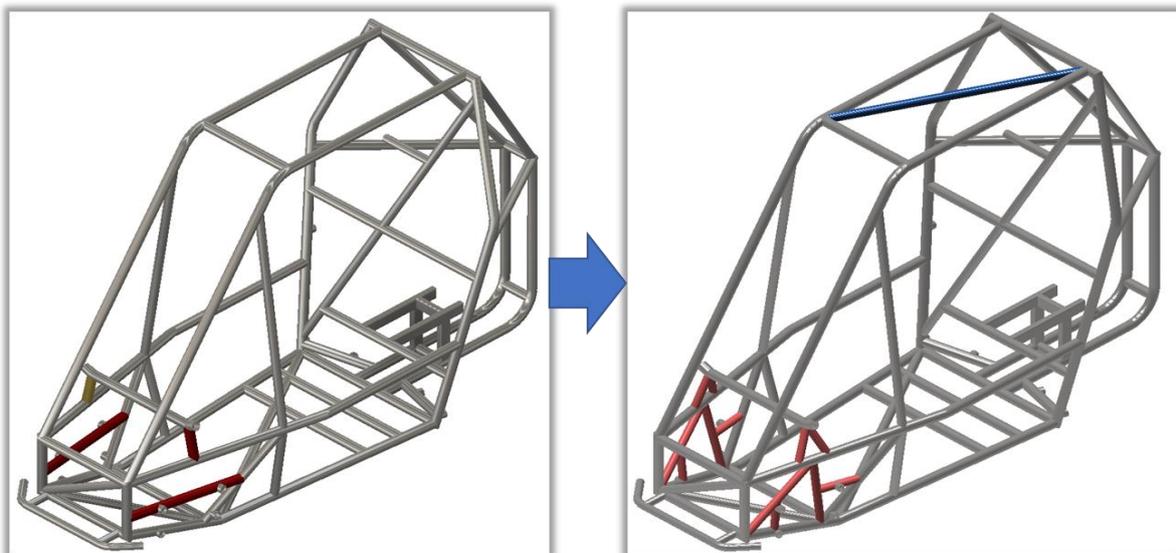


Figura 7 – Modificações na geometria do modelo computacional.

Deste modo, para tal estrutura repetiu-se a mesma análise realizada na original, utilizando os mesmos parâmetros de malha, condições de contorno, carregamento e pontos de análise de deslocamento.

Por fim, para ambas as estruturas foram realizadas as análises modais de vibrações livres, as quais são determinadas com o chassi livre, isto é, sem condições de contorno, com o intuito de encontrar as respostas de suas respectivas frequências fundamentais e modos de vibrar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São obtidos os dados necessários para determinar a reta de momento por deslocamento angular da estrutural original e da modificada, trazendo como consequência a própria constante da equação da reta tornar-se a rigidez torcional, que apresentou o valor de 688,41 N.m/° para a estrutura original e 1.169,2 N.m/° para a estrutura modificada, conforme Fig. 8.

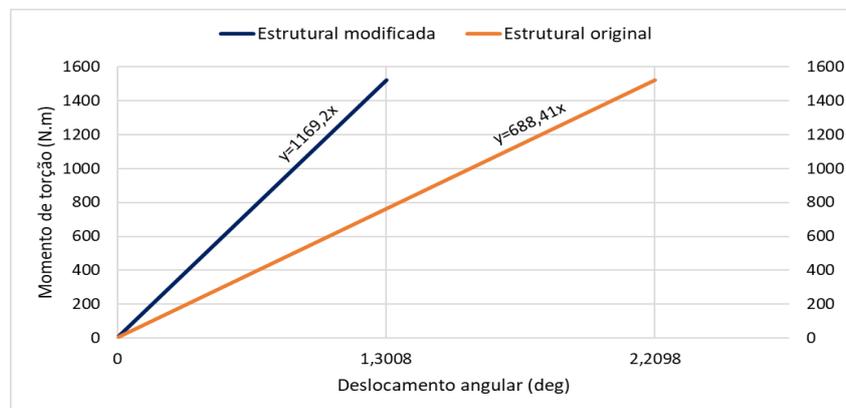


Figura 8 – Linearização da rigidez torcional dos modelos analisados.

Ao comparar-se os resultados entre as estruturas, obteve-se um aumento 69,84% na rigidez torcional da dianteira. Além disso, verifica-se também que a estrutura original estava fora da recomendação da literatura, isto é, podendo causar sérios riscos à segurança do piloto e ao desempenho do veículo, enquanto que para a estrutura modificada, observou-se que o considerável aumento na rigidez torcional atendeu à recomendação da literatura.

Por fim, obtiveram-se as frequências naturais das estruturas de acordo com a Tabela 3. Para efeito de comparação, foram selecionados somente os 10 primeiros modos de vibração para simplificação de resultados.

Tabela 3 – Resultados vibracionais da análise modal das estruturas.

Modo de vibração	Frequência natural Estrutural original	Frequência natural Estrutural modificada
1 a 6	0	0
7	52,354 Hz	55,577 Hz
8	55,968 Hz	60,767 Hz
9	73,081 Hz	72,493 Hz
10	87,524 Hz	94,878 Hz

Fonte: Autoria própria.

Os seis primeiros modos de vibração representam os modos de translação e rotação da estrutura em torno da sua origem, sendo nulos por conta do chassi não possuir condições de contorno tratando-se de vibrações livres. Logo, consideram-se os modos de vibração da estrutura real a partir do sétimo modo.

Verifica-se que com o aumento da rigidez da estrutura as frequências fundamentais aumentam aproximadamente 5,21%. Tal incremento condiz com a equação de frequência fundamental apresentada no trabalho, mostrando que estruturas com baixas frequências naturais apresentam risco de possuírem baixa rigidez, comprometendo todo o protótipo durante o seu funcionamento, com possibilidade de deformações plásticas e fenômenos vibracionais como a ressonância, que pode gerar desgaste por fadiga ou ruídos.

5. CONCLUSÃO

Nota-se que a utilização de elementos treliçados em partes da estrutura que recebem esforços torcionais podem ser soluções viáveis para garantir a estabilidade do desempenho do protótipo, de tal modo que esta é refletida na magnitude da rigidez torcional do mesmo. De todo modo, mostra-se ainda que o estudo de frequências naturais se torna outro método complementar alternativo para o estudo da rigidez torcional.

A importância destes estudos é transmitida diretamente pela funcionalidade do chassi, visto que caso o mesmo não seja rígido o suficiente para o seu projeto, suas deformações modificarão totalmente a disposição dos demais subsistemas envolvidos, desacordando-se assim com a performance pré-estabelecida nos objetivos do projeto do veículo. Sugere-se que futuramente seja analisada a rigidez torcional traseira da estrutura, a fim de se determinar a rigidez média total da mesma e trazer maior confiabilidade para o projeto automotivo.

REFERENCES

- CHANDRA, M. R., SREENIVASULU, S., HUSSAIN, S. T.; *Modeling and Structural Analysis of Heavy Vehicle Chassis Made of Polymeric Composite Material by Three Different Cross Sections*. Journal of Mechanical and Production Trans Stellar, 2012.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl.; *Fundamentos de Física 1 - Mecânica*. 9. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2012. 340 p.
- HAPPIAN-SMITH, J.; *An Introduction to modern vehicle design*. Butterworth Heinemann, 2002.
- LAW, E.H.; Raju, S.; Thompson, L.L.; *Design of a Winston Cup Chassis for Torsional Stiffness*. Motorsports Engineering Conference and Exposition, 1998.
- MILLIKEN, William F.; MILLIKEN, Douglas L.; *Race car vehicle dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1995. 890 p.
- RAO, Singiresu S. *Vibrações Mecânicas*. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2008. xv, 424 p.
- SAMPÒ, Enrico. *Vehicle chassis and vehicle dynamics. Modelling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation*. 2011. p. 5-30. Dissertação (Doutorado) – Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Guildford, 2011. Disponível em: <<http://core.ac.uk/download/pdf/16517785.pdf>>. Acesso em: 10 de julho de 2018.
- TEBBY, S.; ESMAILZADEH, E.; BARARI, A.; *Methods to Determine Torsion Stiffness in an Automotive Chassis*. University of Ontario Institute of Technology, 2011.

COMPARATIVE STUDY OF TORSIONAL STIFFNESS OF A SPACE FRAME CHASSIS OF BAJA SAE TYPE

Abstract. *This work simulates the conditions of torsional stresses at the front of a Baja SAE prototype during the passage through rough terrain, evaluating the torsional stiffness of the structure and optimizing its critical points. In the analysis method, geometry modeling was performed in Autodesk Inventor® software and mathematical modeling in Ansys® software. Preparing the analysis, finite element mesh parameters as well as torsional loads and boundary conditions were applied in the original structure and in another version with the addition of truss elements. As results, the rigidity of the modified structure reached a gain of 69.84%, in the value of 1169.2 Nm / °, acceptable within the literature, as well as the natural frequencies increased 5.21%, showing the modal study as another alternative to complement the rigidity study.*

Keywords: *Baja; torsional stiffness; chassis; vibrations; finite elements.*