

Estudo da vibração em um veículo Fórmula SAE por simulação

Study of vibration in a Formula SAE vehicle through simulation

Estudio de la vibración en un vehículo Fórmula SAE mediante simulación

Recebido: 16/09/2024 | Revisado: 23/09/2024 | Aceitado: 24/09/2024 | Publicado: 27/09/2024

Caio Vinícius Andrade Galvão

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4385-6936>

Universidade Federal de Paraíba, Brasil

E-mail: caio.andrade320@gmail.com

Halane Maria Braga Fernandes Brito

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-1720>

Universidade Federal de Paraíba, Brasil

E-mail: halane@ct.ufpb.br

Resumo

Este artigo tem como objetivo analisar a influência das vibrações do motor Yamaha XT660R em um chassi tubular de FSAE, utilizando simulações computacionais. Nessas simulações foram utilizados software de elementos finitos para análise modal, identificando os modos críticos de vibração do chassi e suas frequências naturais. Os resultados indicam modos de vibração que podem coincidir com as frequências operacionais do motor, apontando para a necessidade de modificações estruturais para mitigar possíveis falhas. Este estudo não só fornece uma base teórica para futuras validações experimentais, mas também oferece recomendações práticas para aprimorar o projeto de veículos de competição, contribuindo quanto a segurança e o desempenho.

Palavras-chave: Fórmula SAE; Vibrações mecânicas; Análise modal; Simulação computacional; Ensino em Engenharia.

Abstract

This article aims to analyze the influence of the Yamaha XT660R engine vibrations on an FSAE tubular chassis using computational simulations. In these simulations, finite element software was used for modal analysis, identifying the critical vibration modes of the chassis and its natural frequencies. The results indicate vibration modes that may coincide with the operational frequencies of the engine, highlighting the need for structural modifications to mitigate potential failures. This study not only provides a theoretical basis for future experimental validations but also offers practical recommendations to improve the design of competition vehicles, contributing to safety and performance.

Keywords: Formula SAE; Mechanical vibrations; Modal analysis; Computational simulation; Engineering teaching.

Resumen

Este artículo tiene como objetivo analizar la influencia de las vibraciones del motor Yamaha XT660R en un chasis tubular de FSAE, utilizando simulaciones computacionales. En estas simulaciones se utilizó software de elementos finitos para el análisis modal, identificando los modos críticos de vibración del chasis y sus frecuencias naturales. Los resultados indican modos de vibración que pueden coincidir con las frecuencias operativas del motor, señalando la necesidad de modificaciones estructurales para mitigar posibles fallos. Este estudio no solo proporciona una base teórica para futuras validaciones experimentales, sino que también ofrece recomendaciones prácticas para mejorar el diseño de vehículos de competición, contribuyendo a la seguridad y el rendimiento.

Palabras clave: Fórmula SAE; Vibraciones mecánicas; Análisis modal; Simulación computacional; Enseñanza en Ingeniería.

1. Introdução

A Fórmula SAE (FSAE) é uma competição estudantil organizada pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), na qual equipes formadas por estudantes de engenharia de diversas instituições acadêmicas projetam e constroem protótipos de carros do tipo Fórmula. Esses veículos, caracterizados por possuir rodas expostas e comportar apenas o piloto, são projetados e avaliados para atender a critérios de desempenho e eficiência em pista, análise de segurança, custo e detalhes de projeto, sendo avaliados em provas estáticas e dinâmicas (SAE Brasil, 2024).

O chassi é uma das partes essenciais de um veículo, sendo responsável por suportar as cargas estáticas e dinâmicas, a exemplo dos componentes do veículo, incluindo motor, tanque de combustível, bateria, suspensão, componentes elétricos, assento, entre outros (Chittaliya, Anghan & Vaghani, 2021; Steward, 2014). Ele contribui para a segurança do motorista/piloto, absorvendo e redistribuindo cargas de impactos por toda a estrutura (Eakambaram, Baskara, Saibalaji & Baskar, 2021). Segundo Venâncio (2013), o chassi não se resume a ser um simples esqueleto no qual os demais componentes são fixados, mas também está diretamente ligado ao desempenho do veículo e à segurança do piloto. Para um bom desempenho em pista, sua estrutura deve apresentar maior rigidez à torção. O design do chassi afeta diretamente a rigidez à torção e a estabilidade do veículo, influenciando o controle, a estabilidade, a aderência e a eficiência (Agarwal *et al.*, 2020; Steward, 2014). Eakambaram *et al.* (2021) enfatizam que a rigidez à torção elevada ajuda a minimizar a flexão indesejada e o comportamento devido à vibração excessiva. Em seu estudo, Jogi, Take, Asolkar e Aftab (2014) destacam a importância de um bom design de chassis para a segurança e performance de carros de corrida, utilizando materiais adequados e análises detalhadas para otimizar a resistência e reduzir a deflexão estrutural.

O motor é uma fonte de vibrações em qualquer veículo (Singh, 2010), e a vibração do motor em veículos do tipo FSAE pode impactar diretamente tanto a performance quanto a durabilidade do veículo. Além disso, como sugerem Schweighardt, Vehovszky e Feszty (2020), há impacto nas formas de ressonância críticas do ponto de vista de ruído, vibração e fadiga. Rao (2008) observa que, devido à vibração intensa e constante, estruturas ou componentes de máquinas podem falhar por fadiga do material, além de ocorrer o desgaste de peças como rolamento e engrenagens, ruído excessivo e afrouxamento ou soltura de elementos de fixação. Adams (2010) ratifica dizendo que a vibração pode induzir forças dinâmicas que afetam a integridade das conexões mecânicas, desde o afrouxamento até a falha. Mohamad *et al.* (2017) destacam a importância do design adequado do chassi, que deve ser capaz de suportar cargas dinâmicas e estáticas, incluindo vibrações, torções e impactos, sem comprometer a integridade estrutural. Itu e Sorin (2023) analisaram o impacto das vibrações geradas pelo carro no corpo de um boneco (*dummy*), simulando as condições enfrentadas por um piloto durante uma corrida, destacando a importância de considerar os efeitos das vibrações em projetos de veículos de corrida para garantir a segurança e o bem-estar dos pilotos durante as competições.

Sani *et al.* (2011) concluíram que é essencial compreender as características dinâmicas do chassi para evitar ressonâncias que possam comprometer a estrutura, destacando a importância de análises dinâmicas precisas para melhorar o design. Rao (2008) observa que a exposição contínua a frequências críticas, resultante de fenômenos como ressonância e batimento, deve ser evitada, pois pode causar tensões excessivas, levando a trincas e falhas estruturais. A ressonância ocorre quando as frequências naturais da estrutura coincidem com as frequências operacionais do motor, e o batimento ocorre quando frequências de vibração diferentes se combinam, podendo ambos resultar em tensões excessivas.

Nas etapas de projeto e construção de um chassi do tipo FSAE, fatores como a ergonomia, rigidez torcional, vibrações mecânicas e harmônicas devem ser investigadas. Neste contexto, este estudo tem como objetivo analisar a influência das vibrações do motor Yamaha XT660R em um chassi tubular de FSAE, utilizando simulações computacionais. Para isso, a estrutura foi modelada tridimensionalmente no software *SolidWorks* e importada para o *Ansys Academic Workbench* para simulação e análise modal.

2. Metodologia

A metodologia da presente pesquisa é experimental, laboratorial, de natureza quantitativa (Pereira *et al.*, 2018; Koche, 2011) e, do tipo simulação computacional utilizando software de elemento finito para análise modal (Waslawick, 2021).

O estudo foi conduzido através de simulações computacionais utilizando o software *Ansys Academic Workbench*. A

estrutura do chassi foi modelada como sólido no *Solidworks*, e, posteriormente, importada para o *Ansys Workbench* como viga para realização da análise modal. Foram utilizados perfis de tubo de aço SAE 1020, considerando o modelo com quatro refinamentos de malha: 10 mm, 5 mm, 1 mm e 0,75 mm. O motor Yamaha XT660R, com 660 cc e potência máxima de 48 cv, foi o foco da análise das vibrações.

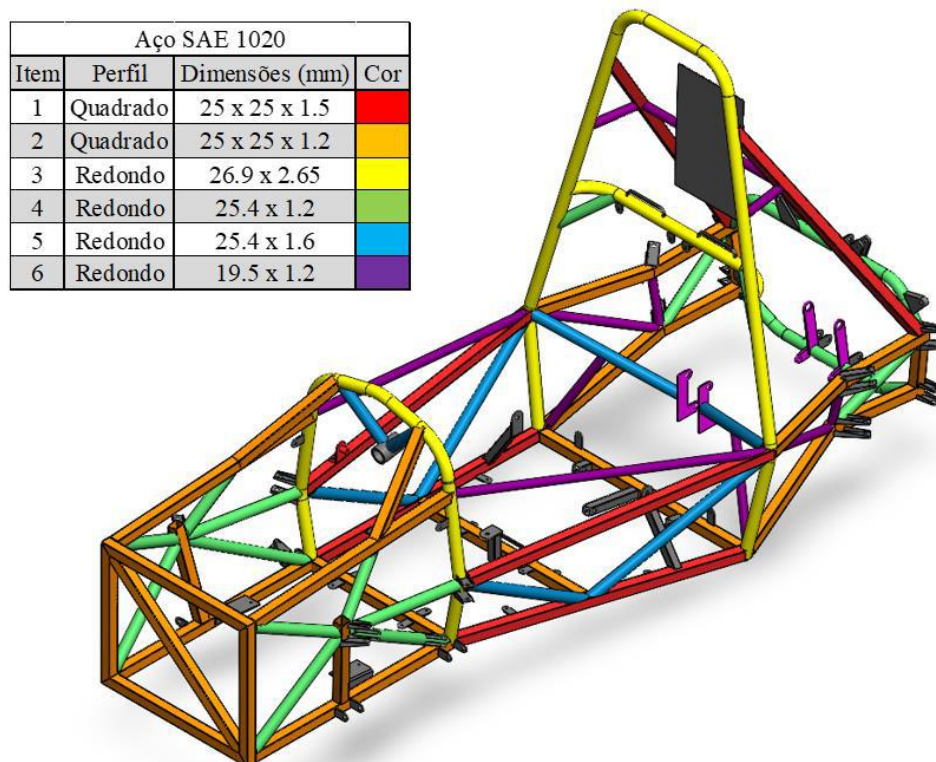
3. Simulações e Análise dos Resultados

3.1 Modelagem da Estrutura

A estrutura do modelo em análise é caracterizada como um chassi tubular, manufaturado com tubos padrão aço SAE 1020, nos formatos quadrado e circular, com módulo de elasticidade de 207 GPa, massa específica de 7.850 kg/m³ e coeficiente de *Poisson* de 0,3.

Para a estrutura do chassi, foram considerados seis perfis de tubo diferentes, conforme mostrado na Figura 1. O arranjo dos perfis foi baseado na distribuição de cargas e na rigidez estrutural, sendo a estrutura modelada como sólido no *SolidWorks* e importada para simulação como elementos de viga no *Ansys Academic Workbench*.

Figura 1 - Chassi do carro com arranjo dos perfis utilizados na análise.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Esse tipo de chassi tubular é atualmente utilizado pela maioria das equipes de FSAE e apresenta um caráter único devido ao seu perfil com triangulações, que restringe os graus de liberdade, além de possuir uma grande variedade de modelos.

Segundo Reddy (2014), os elementos de viga simplificam a modelagem de estruturas complexas ao assumir um comportamento unidimensional, reduzindo a complexidade computacional em comparação aos elementos sólidos. Apesar da simplificação, os elementos de viga podem representar com precisão o comportamento estrutural, sendo eficazes para análises estáticas, dinâmicas e de flambagem, conforme apontado por Bathe (2014). Eles são adequados para modelar componentes

estruturais propensos a vibrações, como vigas, treliças e pórticos, o que os torna versáteis para diversas aplicações em engenharia. Zienkiewicz, Taylor e Zhu (2005) destacam que os resultados de simulações com elementos de viga são mais fáceis de interpretar do que com elementos sólidos, fornecendo informações úteis sobre deflexões, tensões e formas modais, o que auxilia na otimização do projeto.

Foram realizadas quatro simulações, com as malhas de 10mm, 5mm, 1mm e 0,75mm e inferido os doze primeiros modos de vibração. Entretanto, considerando o chassi em análise como uma estrutura livre, sem restrição de deslocamento, os seis primeiros modos de frequências são descartados por apresentar valores iguais a zero ou aproximadamente a zero (Kelly, 2017; Rajappan & Vivekanandhan, 2013). Segundo Santos e Chaves (2021), essa condição de contorno representa os movimentos do chassi em uma pista de competição, sem restrições de movimento ou obstáculos.

A quantidade de elementos e nós estão representados no Quadro 1. Para converter o elemento sólido em elemento de viga, foi utilizado o recurso *SpaceClaim* no *Ansys Workbench*.

Quadro 1 - Relação entre o tamanho da malha com a quantidade de elementos e de nós.

Malha (mm)	Elementos	Nós
10,00	3083	6117
5,00	6110	12171
1,00	30313	60577
0,75	40393	80737

Fonte: Elaborado pelos autores.

A variação da malha permite a análise das frequências a serem obtidas com maior precisão. Moaveni (2020) e Vinjanampati e Veerarapu (2022) destacam que o tamanho da malha deve equilibrar precisão e custo computacional, pois uma malha muito refinada pode aumentar o tempo de processamento sem melhorar proporcionalmente a precisão dos resultados.

3.2 Parâmetros do Motor Yamaha XT660R

Para a competição, a FSAE Brasil estabelece que os motores devem ter até 750 cc, sem limitação mínima, permitindo apenas o uso de motores de moto. Nesta análise, foi utilizado um motor Yamaha XT660R, com cilindrada de 660 cc. As principais características desse motor são detalhadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Características do motor Yamaha XT660R.

Item	Dados
Peso (sem fluidos)	62 kg
Dimensões	400x400x500 mm
Tipo	Monocilíndrico 4T
Potência (máx)	48 cv a 6000 rpm
Torque (máx)	5,95 kgf*m
Rotação em marcha lenta	1300 ~1500 rpm

Fonte: Yamaha (2003).

Baseado nas informações deste quadro, encontra-se uma faixa de frequência de operação de 21,67 Hz a 100 Hz para a mínima e a máxima potência.

3.3 Análise Modal

As frequências naturais de uma estrutura estão relacionadas aos seus diferentes modos de vibração, refletindo as características do sistema conforme sua construção. Essas frequências podem ser determinadas por meio da análise modal, que utiliza de simulações para determinar as propriedades dinâmicas de uma estrutura quando submetida a vibrações. Isso permite identificar a forma natural de vibração da estrutura e analisar as deformações e tensões máximas no chassi. Portanto, a análise modal foi realizada para identificar as frequências naturais de cada modo de vibração da estrutura, conforme mostrado na Tabela 1. As simulações consideraram a estrutura em condição livre, suprimindo os seis primeiros modos de vibração relacionados às translações e rotações básicas.

Tabela 1 - Frequências da estrutura com diferentes malhas obtida da análise modal.

Modo de Vibrar	Frequências [Hz]			
	Malhas [mm]			
	10,00	5,00	1,00	0,75
1°	47,499	47,497	47,496	47,496
2°	70,187	70,185	70,185	70,185
3°	74,633	74,628	74,626	74,626
4°	91,499	91,496	91,494	91,494
5°	94,854	94,846	94,843	94,843
6°	109,350	109,350	109,340	109,340

Fonte: Elaborado pelos autores.

Apesar da aproximação das frequências para o mesmo modo em diferentes malhas, em elementos finitos é necessário avaliar o refinamento dessa malha para melhor análise dos resultados. A convergência da malha é um processo essencial para garantir a precisão dos resultados. Esse processo consiste em refinar gradualmente a malha e comparar os resultados até que eles se estabilizem. A convergência dos resultados foi avaliada através da comparação dos diferentes refinamentos de malha, calculando o erro relativo de convergência, conforme apresentado na Tabela 2.

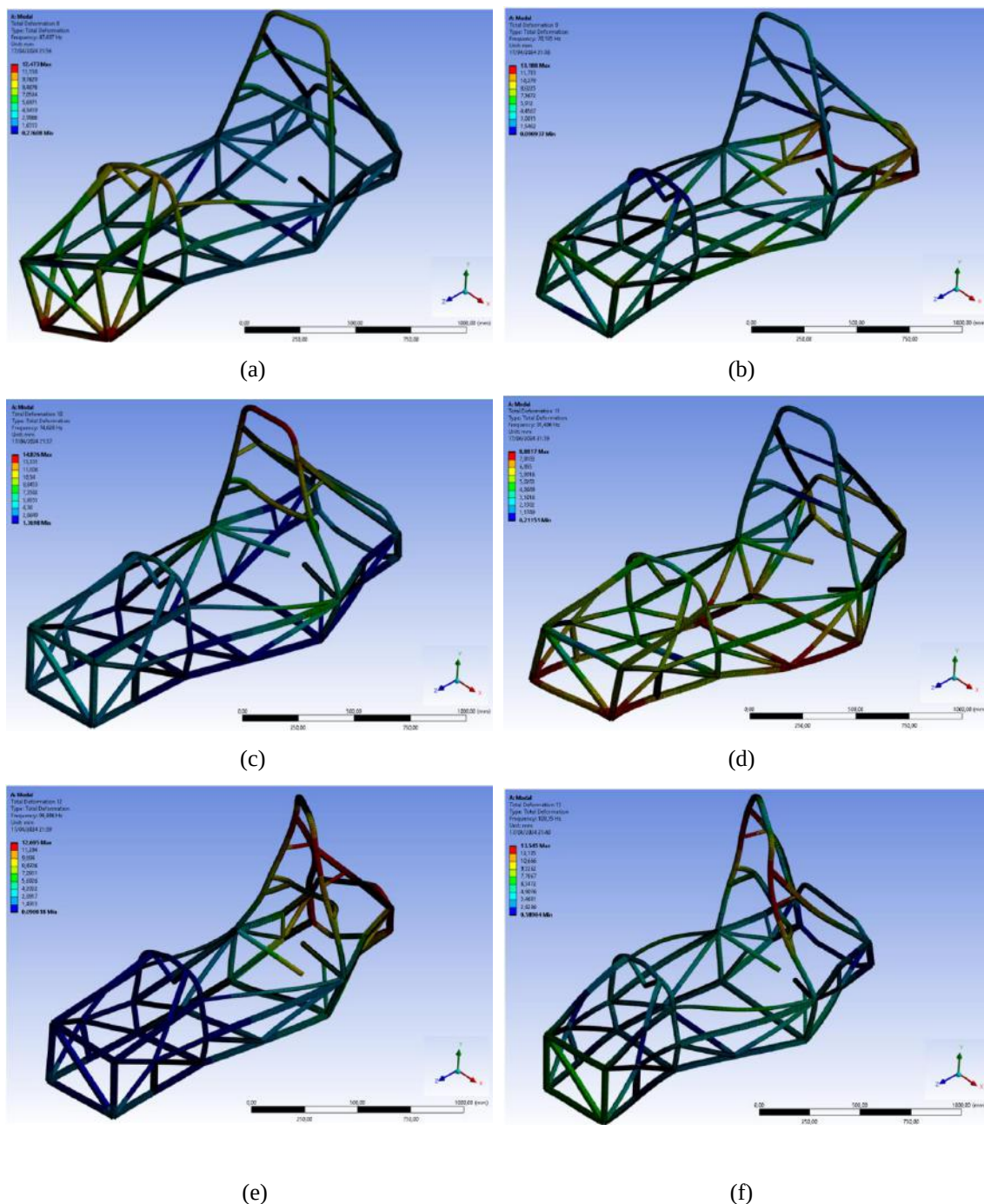
Tabela 2 - Erro de convergência entre as malhas.

Modos de Vibrar	Erro de Convergência (%) em diferentes malhas (mm)					
	10 x 5	10 x 1	10 x 0,75	5 x 1	5 x 0,75	1 x 0,75
1°	0,00421	0,00632	0,00632	0,00211	0,00211	0
2°	0,00285	0,00285	0,00285	0	0	0
3°	0,00670	0,00938	0,00938	0,00268	0,00268	0
4°	0,00328	0,00546	0,00546	0,00219	0,00219	0
5°	0,00843	0,01160	0,01160	0,00316	0,00316	0
6°	0	0,00915	0,00915	0,00915	0,00915	0

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se que a malha de 5 mm apresentou resultados mais estáveis para um menor tempo de processamento. Assim, essa foi a malha utilizada para demonstrar cada um dos modos de vibrar, representados nas Figuras de 2.a a 2.f.

Figura 2 - Modos de vibração utilizando a malha de 5mm: (a) Primeiro modo; (b) Segundo modo; (c) Terceiro modo; (d) Quarto modo; (e) Quinto modo; (f) Sexto modo



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com essas figuras, pode-se inferir como a estrutura se comporta, ou seja, para quais eixos vetoriais ela se move e rotaciona quando aplicada as frequências naturais calculadas pelas análises numéricas do software *Ansys*, conforme disponibilizado na Tabela 1. Assim, ao analisar a vibração do chassi, tem-se a predominância das seguintes deformações:

- 1º modo de vibração: torção ao longo do eixo Z;
- 2º modo de vibração: flexão no eixo Z e torção no eixo Y;
- 3º modo de vibração: flexão ao longo do eixo Y;

- 4º modo de vibração: torção ao longo do eixo Z e flexão no eixo X;
- 5º modo de vibração: torção ao longo do eixo Y e Z;
- 6º modo de vibração: torção ao longo do eixo Y e flexão no eixo Z.

4. Discussão

Considerando que o motor XT660R opera com uma frequência mínima de 21,67 Hz e máxima de 100 Hz, e que, no circuito de competição, o carro pode atingir velocidades entre 70 e 90 km/h, com uma faixa média de 3.000 RPM (50 Hz), infere-se, com base nos dados da Tabela 1, que o fenômeno de ressonância pode ocorrer devido às frequências aproximadas. Sabendo que a rotação do motor não é constante, à medida que a rotação aumenta, outros modos de vibração também ocorrerão na estrutura, com exceção do sexto modo de vibração que está fora da faixa de excitação do motor.

Os modos de vibração identificados mostram esforços predominantes de flexão e/ou torção na estrutura. Steward (2014) observa que, na prática, um chassi é submetido a torção sempre que uma roda encontra uma oscilação na pista e durante curvas, onde as forças laterais causam tanto flexão horizontal quanto torção do chassi. O autor também menciona que a ausência de amortecimento no chassi pode resultar em oscilações torcionais repetidas.

Nesse cenário, para evitar grandes deformações no chassi do veículo, seria necessário que o piloto conduzisse o veículo em uma velocidade que não provoque frequências de excitação próximas da frequência de tais modos, evitando assim possíveis problemas estruturais, como trincas e falha de componente.

Algumas abordagens futuras podem ser empregadas e testadas, tais como:

- Mudança do material utilizado, desde que permitido em regulamento, buscando melhores propriedades mecânicas;
- Modificação na disposição do chassi, seja na triangulação e arranjo dos tubos, para ajuste na rigidez específica da estrutura;
- Variação dos perfis de tubos, com diferentes espessuras e comprimentos;
- Estudo em uso de absorvedores de impacto (comumente conhecidos como coxim), buscando a redução dessas vibrações.

5. Considerações Finais

Os resultados deste estudo indicam que as frequências naturais da estrutura tubular do Fórmula SAE coincidem com as frequências operacionais do motor Yamaha XT660R, particularmente na faixa de 47,49 Hz a 100 Hz. Este alinhamento pode resultar em ressonância e potenciais falhas estruturais. Recomenda-se a implementação de medidas mitigadoras, como a utilização de materiais com melhores propriedades mecânicas, ajustes na triangulação da estrutura e uso de absorvedores de impacto.

Embora o estudo tenha alcançado seus objetivos, há áreas que merecem atenção adicional. Em trabalhos futuros, por exemplo, avaliação experimental do modelo utilizando acelerômetros, com a finalidade de validar o estudo abordado, verificando se a faixa de frequência se enquadra com os resultados obtidos tanto da estrutura quanto da influência do motor na mesma. Esses encaminhamentos podem ajudar a ampliar o entendimento das vibrações na estrutura e contribuir para o avanço do conhecimento nessa área.

Referências

Adams, D. E. (2010). Mechanical Vibrations. Springer.

- Agarwal, S., Awasthi, P., Saatyaki, T., Kushwaha, M., & Jaiswal, V. (2020). Design & analysis of spaceframe chassis for FSAE vehicle. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(03), 559-561.
- Bathe, K. J. (2014). *Finite Element Procedures*. Pearson Education.
- Chittaliya, S., Anghan, H., & Vaghani, U. (2021). A methodological study to analyze and design the car chassis. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 9(12), 390-394. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.39306>.
- Eakambaram, A., Baskara Sethupathi, P., Saibalaji, M. A., & Baskar, A. (2021). Experimental analysis and validation of torsional stiffness of a tubular space frame chassis. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7719-7727. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.238>.
- Itu, C., & Sorin, V. (2023). The effect of vibrations from racing cars on the human body in FORMULA STUDENT races. *Applied Sciences*, 13(22), 12150. <https://doi.org/10.3390/app132212150>.
- Jogi, N. G., Take, A. P., Asolkar, Y., & Aftab, S. M. (2014). Review work on analysis of F1 car frame using ANSYS. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(4), eISSN: 2319-1163, pISSN: 2321-7308.
- Kelly, S. G. (2017). *Vibrações mecânicas: teoria e aplicações*. Cengage.
- Koche, J. C. (2011). *Fundamentos de metodologia científica*. Vozes.
- Moaveni, S. (2020). *Finite element analysis: Theory and application with ANSYS (5th ed.)*. Pearson.
- Mohamad, M. L., Rahman, M. T. A., Khan, S. F., Basha, M. H., Adom, A. H., & Hashim, M. S. M. (2017). Design and static structural analysis of a race car chassis for Formula Society of Automotive Engineers (FSAE) event. *Journal of Physics: Conference Series*, 908, 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/908/1/012042>.
- Pereira A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free e-book]. Ed. UAB/NTE/UFSM.
- Rajappan, R., & Vivekanandhan, M. (2013). Static and modal analysis of chassis by using FEA. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2(2), 63-73. ISSN: 2319-1813. ISBN: 2319-1805.
- Rao, S. (2008). *Vibrações Mecânicas*. Pearson Education do Brasil.
- Reddy, J. N. (2014). *Uma Introdução à Análise Não Linear de Elementos Finitos*. Oxford University Press.
- SAE Brasil. (2024). *Fórmula SAE Brasil*. SAE Brasil. <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil/>.
- Sani, M. S. M., Rahman, M. M., Noor, M. M., Kadirgama, K., & Izham, M. H. N. (2011). Identification of dynamics modal parameter for car chassis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 17, 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/17/1/012038>.
- Santos, H. R., & Chaves, A. R. (2021). Análise estrutural por elementos finitos do chassi de um veículo Baja SAE. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 06(12), 153-180. <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/veiculo-baja-sae>.
- Schweighardt, A., Vehovszky, B., & Feszty, D. (2020). Modal analysis of the tubular space frame of a Formula Student race car. *Manufacturing Technology*, 20(1), 84-91. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.013>.
- Singh, R. P. (2010). Structural performance analysis of Formula SAE car. *Jurnal Mekanikal*, 31, 46-61.
- Steward, D. (2014). *Race car design*. London: Palgrave.
- Venâncio, N. F. (2013). *Projeto do chassis de uma viatura fórmula* (Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). Porto, Portugal.
- Vinjanampati, P., & Veerarapu, S. (2022). Methodology for performing submodel analysis for random vibration problems using modal analysis results. *SAE Technical Paper 2022-26-0012*. <https://doi.org/10.4271/2022-26-0012>
- Waslawich, R. (2021). *Metodologia de Pesquisa para Ciência da Computação*. (3.ed.). Editora: GEN LTC.
- Yamaha. (2003). *XT660R(S)/XT660X(S) service manual*. MBK Industrie.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). *Finite Element Method - Its Basis and Fundamentals*. Elsevier Butterworth-Heinemann.