



10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
05 a 07 de agosto de 2019, São Carlos, SP, Brasil

ANÁLISE ESTÁTICA DE UM EIXO CARDAN SUBMETIDO A ESFORÇOS TORCIONAIS

Fernanda dos Santos Silva

Universidade Federal do Ceará - Campus Russas
nandasilva@alu.ufc.br

Amanda Accorsini

Universidade Federal do Ceará - Campus Russas
amandaaccorsini@gmail.com

Mateus Cintra Dantas

Universidade Federal do Ceará - Campus Russas
mmmmateuscintra@hotmail.com

Pedro Karol Wojtyla Dantas

Universidade Federal do Ceará - Campus Russas
Pedrokaroll@outlook.com

Cândido Jorge de Sousa Lobo

Universidade Federal do Ceará - Campus Russas
candidojslobo@ufc.br

Resumo. Os eixos cardan são componentes automotivos presentes no sistema de transmissão de automóveis com tração traseira e motor dianteiro. Eles possuem a função de transmitir o torque do motor para os diferenciais. Estão presentes em veículos de grande porte, tais como caminhões e ônibus. Em geral, os eixos são fabricados em aços. Porém, outros diversos materiais vêm sendo empregados para a fabricação dos eixos-cardan. Dentre eles estão os materiais compósitos. Este artigo possui como objetivo apresentar o desenvolvimento de um modelo computacional de um eixo cardan e uma análise do componente empregando o método dos elementos finitos, a fim de analisar o comportamento das propriedades físicas e mecânicas de três materiais selecionados: Aço inoxidável-304, Aço SAE 1045 e a fibra de carbono Toray T700SC-12K-50C.

Palavras chave: Cardan. MEF. Aço. Fibra de carbono.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento crescente das indústrias automobilísticas advém da velocidade do surgimento de novas tecnologias, visto que novas ferramentas computacionais mais ágeis e precisas são criadas, possibilitando a otimização de processos e o projeto de componentes com melhor desempenho. Por conseguinte, a demanda por peças com maior capacidade de transmissão de potência tem crescido no setor automotivo, de modo a requerer componentes com maior resistência à fadiga e a esforços estáticos (Barsoum, et al., 2014).

Além do desempenho estrutural, outra preocupação dentro do campo automotivo é a redução da massa dos componentes mecânicos. Devido à escassez dos recursos naturais e o crescente aumento da demanda energética, soluções são estudadas para a redução de massa, a fim de reduzir o consumo de combustível, principalmente por questões ecológicas (Stedile Filho, 2016).

Um componente automotivo muito importante, presente no sistema de transmissão, é o eixo cardan. Ele é responsável por transmitir o torque gerado pelo motor para o diferencial, gerando o movimento das rodas. É utilizado em veículos de tração traseira e motor dianteiro, como por exemplo caminhões, pick-ups e ônibus.

Para realizar o projeto do eixo cardan, deve-se levar em consideração diversos parâmetros, tais como a vida útil do componente e o custo benéfico. A maior parte dos eixos, são fabricados em aço. Entretanto, materiais alternativos continuamente são empregados de modo a buscar diminuir a massa total do veículo e obter melhor desempenho do componente. Exemplo disto, são os materiais compósitos que cada vez mais estão sendo empregados no cenário automotivo (Lee et al., 2004). Segundo estudos, a substituição do material convencional do eixo por compósito pode resultar em uma redução de massa de até 72% (Khoshnavan e Paykani, 2012).

Este trabalho possui como objetivo de analisar por meio do Método dos Elementos Finitos o comportamento de um eixo cardan, sujeito aos esforços presente em caminhões e pick-ups, quando submetido a carregamentos torcionais, avaliando os deslocamentos e tensões resultantes quando o eixo simulado é composto de quatro materiais diferentes.

2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Método dos elementos finitos (MEF) é um método matemático no qual um meio contínuo é subdividido em diversas partes menores, mantendo as suas propriedades originais. Para descrever estes modelos, são utilizadas equações diferenciais, resolvidas através de métodos matemáticos (Lotti, et al, 2006). Sua utilização pode proporcionar benefícios às pesquisas científicas, uma vez que para realizar análises experimentais é necessário a utilização de equipamentos e laboratórios que demandam altos custos operacionais (Burstone e Pryputniewicz, 1980).

Para a utilização do método, um modelo deve ser criado em um software específico, como o Solid Edge® por exemplo. Posteriormente, este modelo deve ser discretizado em pequenos elementos, cuja geometria normalmente possui formatos tetraédricos ou hexaédricos (Gallagher, 1975). Quanto mais discretizado o elemento, mais precisa será a análise. As extremidades dos elementos são ligadas por pontos denominados “nós”. Os nós determinam os graus de liberdade do elemento, de modo a determinar qual as direções o elemento pode se movimentar. Esse movimento pode ser bi ou tridimensional (Lotti, et al, 2006).

Após a discretização do modelo, as propriedades físicas e mecânicas devem ser obtidas a partir de fontes confiáveis de acordo com o modelo a ser utilizado na simulação ME. Essa etapa determina a precisão da análise, de modo que tais propriedades serão responsáveis pela resposta do modelo aos esforços aplicados.

Depois de todas as etapas anteriores e da aplicação dos esforços, pode ser feita a análise dos resultados, onde eles são apresentados através de equações algébricas, representando as tensões e deformações distribuídas pelo modelo, utilizando as figuras geradas nos pós processamento do pacote computacional que apresentam os campos de deslocamento e tensão em todo o modelo.

3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Os eixos oferecidos no mercado, em sua grande maioria são fabricados em aço. Os processos de fabricação utilizados para esse tipo de material usualmente são fundição ou usinagem.

O advento de novas tecnologias, possibilita que novos processos de fabricação surjam, aliados a isto, novos materiais mais leves e mais resistentes ganham espaço, podendo ser empregados para a fabricação dos eixos cardan por exemplo (BAUMHARDT NETO, 2012). Khoshravan (2011) realizou um estudo da aplicação de dois materiais compostos na fabricação de um eixo cardan, um no tubo e outro no garfo motivado pela crescente inserção de materiais compósitos em vários setores da indústria, tais como aeronáutica, automotiva, náutica, entre outros.

Em relação à construção do eixo em fibra de carbono, pode-se levar em consideração os processos disponíveis no mercado para a fabricação de tubos em materiais compósitos, onde os principais fatores a serem considerados são o custo benefício e a disponibilidade. Silva Junior, et al (2015) sugere a utilização do método de enrolamento de filamentos, ou *filament winding*, onde um conjunto de fibras são unidas com resina sobre uma ferramenta em formato cilíndrico, depois são desmoldados. É um processo que confere maior precisão, porém possui um maior custo quando comparado aos processos de fabricação tradicionais.

4. METODOLOGIA

4.1. Construção do modelo

Para o desenvolvimento deste trabalho, um eixo cardan foi construído através do software Solid Edge® 2019. O diâmetro do eixo é de 60mm e seu comprimento é de 1 m com extremidades de encaixe acopladas aos garfos/lucas. Os garfos são responsáveis por transmitir os esforços de torção para o eixo, posicionados à uma angulação de 20°.

Os esforços de transmissão sofridos pelo eixo provenientes do motor foram calculados utilizando como referência um motor à diesel real. O modelo utilizado como referência é da fabricante MWM motores à Diesel, cujos dados técnicos estão mostrados na tabela 1.

De acordo com dados fornecidos pelo fabricante, o índice de rendimento das caixas de câmbio para os veículos comerciais está na faixa de 90 a 97%. Considerando a máxima eficiência do motor, admitiu-se que o torque sofrido pelo sistema de transmissão é de 485 N.m.

Tabela 1: Ficha técnica do motor veicular (Adaptada de MWM motores diesel, 2017)

Ficha técnica de motor veicular da fabricante MWM Motores Diesel									
Modelo	Ciclo de funcionamento	Número de cilindros e disposição	Cilindrada total	Diâmetro X Curso	Sistema de injeção	Taxa de compressão	Potência máxima	Torque máximo	Peso seco
4.10 TCA	4 tempos	4 em linha	4,3 litros	103 x 129	Mecânico	17:1	107 kW (145 cv)	500 N.m.	380 kg

4.2. Seleção dos materiais

Para a seleção dos materiais, levantou-se dados bibliográficos para identificar quais são os materiais mais utilizados para a fabricação do componente em estudo e que mostraram melhor desempenho.

Oliveira (2016) faz um estudo das principais geometrias de eixos de transmissão, onde um dos materiais empregados para a fabricação dos componentes é o aço SAE 1045. Pereira (2015) utiliza o aço SAE 1045 para a fabricação das bases que suportam os pinos presentes nos eixos de transmissão. Silva Junior, et al (2015) utiliza fibras de carbono para a realização de análises em semieixos homocinéticos, provando a viabilidade da aplicação do material nos componentes projetados. As características do aço inoxidável-304 foram obtidas no livro de Hibbeler (2004). As propriedades de todos os materiais podem ser observadas na tabela 2.

Tabela 2: Propriedades dos materiais em estudo (Elaborada por autores).

	Aço inoxidável, 304	Aço SAE 1045	Fibra de carbono
Densidade (kg/m ³)	8027	7870	1621
Módulo de elasticidade (GPa)	193,053	210	164,73
Coefficiente de Poisson	0,29	0,3	0,298

4.3. Simulação através do método dos elementos finitos

De posse dos dados referentes aos esforços sofridos pelo componente e dos materiais que apresentaram melhor desempenho pela literatura, foi realizada uma simulação do modelo tridimensional através do software Solid Edge®, para validação do desempenho do eixo cardan, por meio do método dos elementos finitos. Primeiramente, simulou-se os efeitos dos esforços torcionais sobre eixos de aço inoxidável 304, aço SAE 1045 e a fibra de carbono Toray T700SC-12K-50C.

Em seguida, analisou-se a influência dos três materiais em estudo nos níveis de deslocamento, tensão de Von Mises e tensões principais no componente proposto através dos gráficos representando o campo de deslocamento ou tensão do modelo de elementos finitos gerados pelo software, a fim de identificar qual material proporciona um melhor desempenho. Os gráficos são gerados de acordo com o critério de Von Mises.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a obtenção dos gráficos, é possível analisar o comportamento do eixo de acordo com cada material empregado na fabricação. Os resultados mostram que todos modelos possuem uma margem de segurança confortável. Na tabela 3 estão apresentados os resultados de tensão e deslocamento do eixo de acordo com cada material empregado na simulação, tais como tensões principais, de cisalhamento, tensão de Von Mises e deslocamento.

Tabela 3: Propriedades mecânicas dos materiais (Elaborado por autores).

	Aço inoxidável	Aço SAE 1045	Fibra de carbono
Tensões principais máximas (MPa)	226	226	226
Tensão de cisalhamento máxima (MPa)	93,5	93,2	93,2
Tensão de Von Mises (MPa)	173	172	173
Deslocamento máximo (mm)	1,74	1,63	2,08

O primeiro critério analisado, para a definição do material com melhor desempenho, é em relação a rigidez do eixo. Pode-se perceber que entre os aços os deslocamentos apresentados são bem próximos, sendo maior para o aço inoxidável 304, que apresenta 1,74 mm de deslocamento máximo. Enquanto no aço SAE 1045 o deslocamento máximo é de 1,63 mm. A fibra de carbono possui um deslocamento maior do que os aços, com o valor de deslocamento máximo de 2,08mm. O máximo deslocamento ocorre nas regiões com maior descontinuidade geométricas.

A figura 1 mostra o gráfico representando o campo de deslocamento do material fabricado em fibra de vidro que foi o que apresentou maior deslocamento.

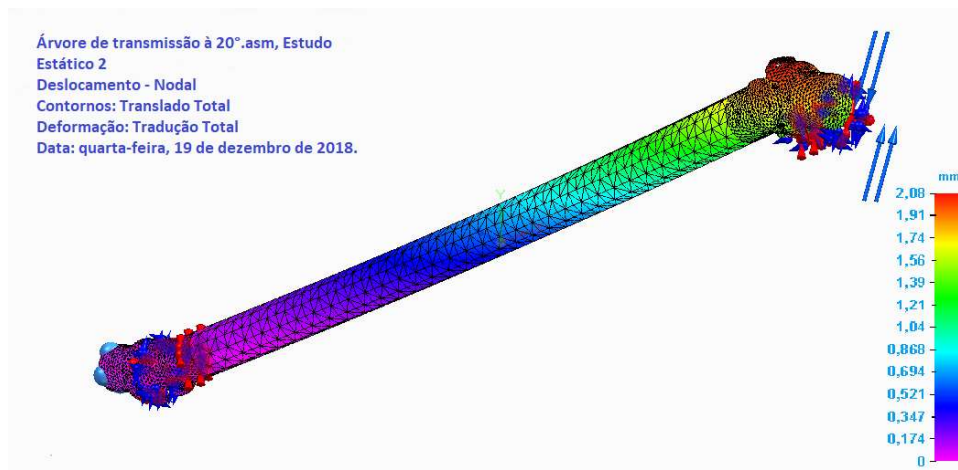


Figura 1: Resultado do deslocamento do eixo em fibra de vidro (Obtido através do software Solid Edge®)

Outro aspecto analisado são as tensões de Von Mises. Para os aços inoxidáveis e para a fibra de carbono o resultado apresentado foi de 173 MPa, enquanto para os eixos com as propriedades do aço SAE 1045 a tensão Von Mises apresentada é de 172 MPa. Dessa forma, é possível observar que os três materiais reagem de forma semelhante à tensão atuante. A tensão de Von Mises do eixo em fibra está mostrada na figura 2.

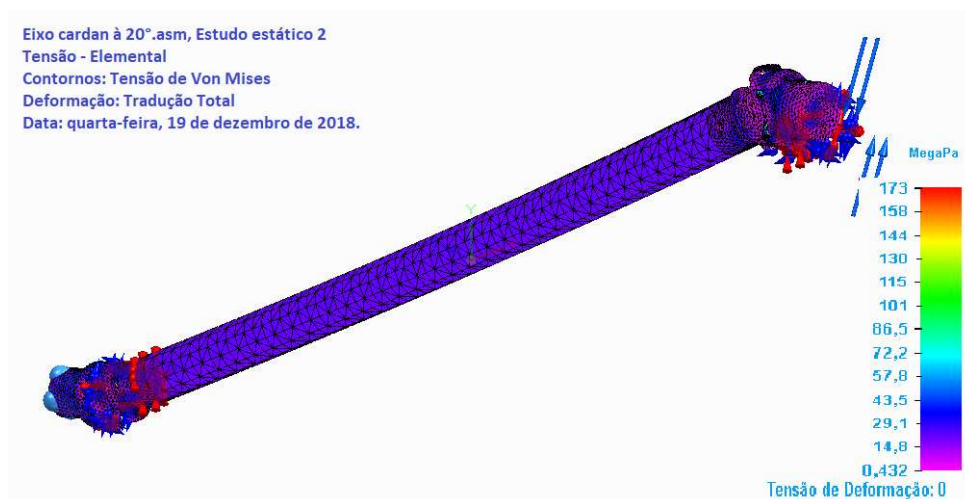


Figura 2: Gráfico da tensão de Von Mises no eixo em fibra de vidro (Obtido através do software Solid Edge®)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da análise, a fibra de carbono apresentou o deslocamento um pouco maior do que os aços. Tanto os aços como a fibra possuem propriedades muito próximas, portanto o desempenho de ambos não apresenta grandes diferenças em seus resultados.

Em relação às tensões principais, tanto os aços como as fibras apresentaram resultados iguais, o que demonstra que os aços e a fibra de carbono possuem desempenho equivalentes em relação às suas propriedades mecânicas. Entretanto, a massa do eixo fabricado em fibra de carbono é muito menor, quando comparada com os outros materiais, podendo-se obter uma redução de até 79% da massa. Porém, deve-se ressaltar que apesar do desempenho em relação à resistência/peso

do eixo, o processo de fabricação de um eixo de fibra é mais caro que os processos convencionais (fundição ou usinagem), desse modo, torna-se necessário realizar uma análise de viabilidade econômica de acordo com a aplicação pretendida.

Como sugestão de trabalho futuro, uma análise experimental deve ser realizada, utilizando modelos reais para a realização de ensaios mecânicos específicos, para a validação do estudo aqui apresentado.

7. REFERÊNCIAS

- Baumhardt Neto, V.F. *Otimização geométrica de um semi-eixo automotivo*. 2012. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- Barsoum, I., Khan, F. e Barsoum, Z. - *Analysis of the torsional strength of hardened splined shafts*. *Materials and Design*; 54, 130–136, 2014.
- Burstone, C.J.; Pryputniewicz, R. J. *Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces*. *Am J Orthod*, St. Louis, v. 77, no. 4, p. 398-409, Apr. 1980.
- Gallagher, R.H. *Introduction in Finite element analysis: fundamentals*. 4. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975. cap. 1, p. 1-19.
- Hibbeler, R.C., *Resistência dos Materiais*. Pearson Prentice Hall, 5a edição, São Paulo, 2004.
- Khoshrahan MR, Paykani, A. *Design of a composite drive shaft and its coupling for automotive application*. *Journal of Applied Research and Technology*; 10, 826-834, 2012
- Khoshrahan, M. R., Paykani, A., & Akbarzadeh, A. (2011, abril). Design and Modal Analysis of Composite Drive Shaft for Automotive Application. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(4), 2543-2549.
- Lee, D.G., Kim, H.S., Kim J.W. e Kim, J.W. - *Design and manufacture of automotive hybrid aluminum composite propeller shaft*. *Composite Structures*; 63, 87-99, 2004.
- Lotti, R.S., Machado, A.W., Mazzeiro, E.T. *Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos*. *R Dental Press Ortodon Ortop Facial*, v. 11, n. 2, p. 35-43, 2006.
- MWM Motores Diesel (São Paulo - Sp). *Portfólio de produtos*. 2017. Disponível em: <<https://www.mwm.com.br/site.aspx/industrial>>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- Oliveira, D.T.M. *Sistema de direção aplicado em eixos trativos em veículos de tração total*. 2016. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá - Sp, 2016.
- Pereira, L.E.R. *Caracterização microestrutural e propriedades mecânicas em pinos para transmissão mecânica de aço inoxidável martensítico e pinos fusíveis de latão em chave de alta tensão*. 2015.
- Silva Junior, C.J., Fonseca, J.S. O. *Dimensionamento de um eixo em compósito de fibra de carbono e resina epóxi para transmissão de potência aplicado a semieixos homocinéticos*. 2015. 28 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- Stedile Filho, P. *Comportamento mecânico de cilindros de carbono/epóxi processados por enrolamento filamentar para semieixos de transmissão*. 2016. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rs, 2016.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

STATIC ANALYSIS OF A CARDAN AXLE SUBJECT TO TORCIONAL EFFORTS

Abstract. *The cardan shafts are automotive components present in the car transmission system with front and rear wheel drive. They have the function of transmitting the motor torque to the differentials. They are present in large vehicles, such as trucks and buses. In general, the shafts are made from steels. However, several other materials are used for the manufacture of the cardan shafts. Among them are composite materials. This paper aims to present the development of a computational model of a cardan shaft and an analysis of the component using the finite element method in order to analyze the behavior of the physical and mechanical properties of three selected materials: Stainless steel-304, Steel SAE 1045 and the Toray T700SC-12K-50C carbon fiber.*

Keywords: *Cardan. FEM. Carbon fiber.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.