



ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM CUBO SINCRONIZADOR PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Priscila Mello Godinho

Wellington Alexandre Cunha

Marco Aurélio Machado

Euzébio César de Jesus Castilho

priscila.godinho@fcagroup.com

wellington.cunha@fcagroup.com

marcoaurelio.machado@fcagroup.com

euzebio.castilho@fcagroup.com

FCA Fiat Chrysler Automobiles

Avenida do Contorno, 3455, Bairro Paulo Camilo, Betim, 32669-900, Minas Gerais, Brasil.

Pedro Américo Almeida Magalhães Junior

pamerico@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Avenida Dom José Gaspar, 500, Bairro Coração Eucarístico, Belo Horizonte, 30.535-901, Minas Gerais, Brasil.

Resumo. O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo numérico para análise estrutural virtual de um cubo sincronizador aplicado às transmissões veiculares, com a finalidade de avaliar a distribuição de tensões sobre o componente, quando submetido a carregamentos que representem as condições de trabalho do mesmo. Para dar maior confiabilidade ao modelo numérico, foram realizados testes experimentais com o componente devidamente montado na transmissão de um veículo, utilizando como carregamento o torque real ao qual o sistema de transmissão está sujeito em operação. Os resultados dos testes foram coletados, realimentando o modelo numérico para a correlação entre a análise virtual e a experimental. É importante salientar a importância deste trabalho sob a ótica de redução de custos, tendo como base a diminuição dos testes experimentais para validação do cubo sincronizador, devido às simulações virtuais possibilitarem melhor análise do componente e possível otimização de geometria. Outra vantagem a ser mencionada é a concepção de um modelo virtual confiável para avaliação de projetos futuros do componente.

Palavras-chave: Cubo sincronizador, Método de Elementos Finitos, Testes Experimentais.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um modelo matemático baseado no método de elementos finitos para a avaliação estrutural de cubos sincronizadores aplicados às transmissões veiculares. Esta avaliação possibilita estudar as tensões e deformações atuantes no componente quando o mesmo está sujeito à aplicação de cargas pré-definidas. Além disso, há a possibilidade de realização de estudos de otimização geométrica bem como avaliar o emprego de novos materiais ao componente, confrontando novas propostas com as soluções já adotadas em produção.

Tal estudo tem grande relevância para o desenvolvimento dos cubos sincronizadores, visto que pouco se conhece a respeito de metodologias mais refinadas para cálculo estrutural deste componente e não há disponibilidade desta modalidade de avaliação do componente disponível na literatura de referência. Outra vantagem agregada a este trabalho é a possibilidade de melhor análise do produto na fase de projeto, reduzindo custos na fase de análises experimentais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico será apresentada uma breve revisão dos principais pontos constituintes deste trabalho. Inicialmente, será apresentado o cubo sincronizador, componente objeto deste estudo, em seguida serão expostos os principais pontos a serem considerados no desenvolvimento de um modelo virtual pelo método de elementos finitos e, finalmente, será mencionada a análise experimental de tensões, a qual é utilizada para validação do modelo virtual.

2.1 Cubo Sincronizador

O cubo sincronizador é uma engrenagem montada diretamente sobre o eixo primário e secundário da transmissão. O papel principal do cubo é suavizar o processo de troca de marchas realizada pelo condutor do veículo, pois este componente facilita a sincronização entre as engrenagens, com ajuda da luva e do garfo de seleção. A sincronização acontece quando se iguala a rotação entre os dentes da engrenagem acionadora e o cubo sincronizador. (LECHNER et. al, 1999).

Atualmente, a maioria dos cubos utilizados são produzidos com uso de aços sinterizados, pois, além de proporcionar elevada resistência mecânica mesmo diante de altas temperaturas de operação, o processo de produção de cubos com aço sinterizado confere boa precisão dimensional à peça, podendo eliminar operações de usinagem, que fazem parte da produção, utilizando outros materiais que passam por diferentes processos de fabricação (CHIAVERINI, 2001).

A figura 1 mostra um exemplo de cubo sincronizador aplicado às transmissões veiculares.



Figura 1. Cubo sincronizador para transmissões veiculares (Catálogo de Peças Fiat, 2013)

2.2 Método de Elementos Finitos

A simulação virtual de componentes pelo método de elementos finitos é um passo importante no projeto de peças e componentes, especialmente aqueles ligados aos projetos automotivos. Esta metodologia de análise permite melhor entendimento do comportamento mecânico do componente a ser estudado (ALVES FILHO, 2006).

Para a realização deste tipo de análise são necessários dados de entrada como a geometria tridimensional do componente em questão, dados do comportamento mecânico do material aplicado, como a curva tensão-deformação, restrições e carregamentos aos quais o componente está sujeito, conforme o seu funcionamento e aplicação.

Em relação aos resultados, esta análise fornece dados importantes para o desenvolvimento do projeto do componente, tais como tensões atuantes, deformações, deslocamentos entre outros, os quais devem ser configurados durante o modelamento da análise. Os resultados obtidos na simulação por elementos finitos podem ser utilizados tanto para confronto com resultados de outras análises virtuais como para comparação com resultados obtidos em testes experimentais realizados sob às mesmas condições de contorno da simulação virtual.

2.3 Método de solução aproximada de Newton-Raphson

A fim de se entender melhor a etapa de processamento do modelo em elementos finitos, segue uma breve explanação do método matemático utilizado. Trata-se do método de solução aproximada de Newton-Raphson.

Segundo Polyanin e Manzhirov (2007), para uma grande maioria das funções contínuas da forma

$$f(x) = 0, \tag{1}$$

não existem formas exatas para cálculo de raízes. Sendo assim, o método de Newton-Raphson sugere que, sendo a aproximação de uma raiz x_n , traça-se uma reta tangente a partir do ponto $[x_n, f(x_n)]$. O ponto em que esta reta tangente cruza o eixo das abcissas representa uma melhor

aproximação da real raiz da função. Este método é representado matematicamente pela equação 2:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \quad n = 0, 1, \dots \quad (2)$$

Em caso de a aproximação atingir a precisão desejada, o método de Newton-Raphson apresenta a convergência

$$|x_{n+1} - c| \leq \frac{M}{2m} |x_n - c|^2, \quad (3)$$

em que M é o valor máximo absoluto de $f''(x)$, m é o valor mínimo absoluto de $f'(x)$ e c é a raiz desejada.

2.4 Análise Experimental de Tensões (EAT)

Instrumentação é um conjunto de técnicas que permite a medição de deformações que atuam nas estruturas ou elementos de máquinas. O objetivo é coletar informações de grandezas físicas das mais diversas como: temperatura, pressão, torque, velocidade e deformações. Os valores obtidos destas medições são a expressão da situação de aplicação real do componente, considerando na maioria das vezes a sua condição de solicitação de carregamento dinâmico. A coleta de dados realizada pela instrumentação tanto pode orientar o projeto do componente, validar cálculos analíticos ou numéricos, verificar vibrações e ressonâncias estruturais como pode servir para avaliar o resultado prático de um projeto elaborado (HOFFMANN, 1989).

3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO EM ELEMENTOS FINITOS PARA AVALIAÇÃO DO CUBO SINCRONIZADOR

Para a avaliação estrutural dos cubos, foi desenvolvido um modelo em elementos finitos para simular a aplicação de torque sobre o cubo e avaliar os resultados de tensão.

O modelo foi construído com a utilização do cubo sincronizador de primeira e segunda marchas montado sobre o eixo secundário de uma transmissão veicular manual. A montagem entre os dois componentes é mostrada a seguir, na figura 2:

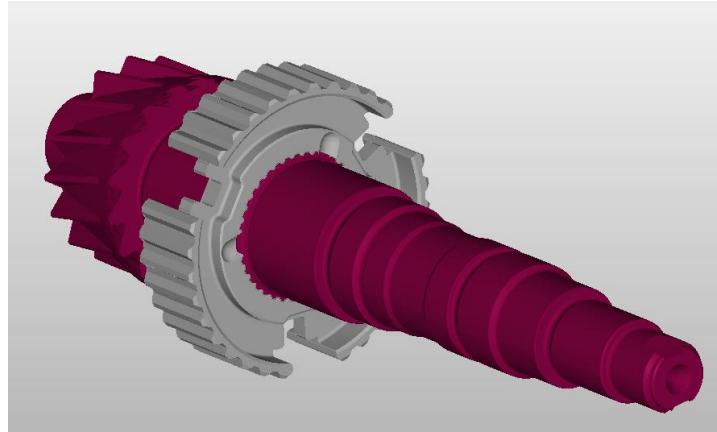


Figura 2. Montagem entre o cubo e o eixo

Como carregamento, foi considerado o torque ao qual o cubo está sujeito quando este se encontra em condição de primeira marcha. O torque nominal (C_{nom}) é o produto entre o torque máximo (C_{max}) e a devida relação de redução (R), conforme mostra a equação 4:

$$C_{nom} = C_{max} \times R \quad (4)$$

O torque aplicado no eixo foi transformado em força tangencial, calculada na divisão entre o torque nominal e o raio primitivo externo do cubo, conforme mostra a equação 5:

$$F_{tan} = \frac{C_{nom}}{r_{prim ext}} \quad (5)$$

A força tangencial foi aplicada diretamente sobre o cubo sincronizador de forma igualmente distribuída por todos os dentes externos do componente. Segundo Godinho e Cunha (2013), esta configuração foi considerada devido a configuração de montagem entre o cubo sincronizador e a luva, em que os dentes internos da luva são totalmente acoplados com os dentes externos do cubo, não havendo defasagem na distribuição o torque, conforme demonstrado na figura 3 a seguir:

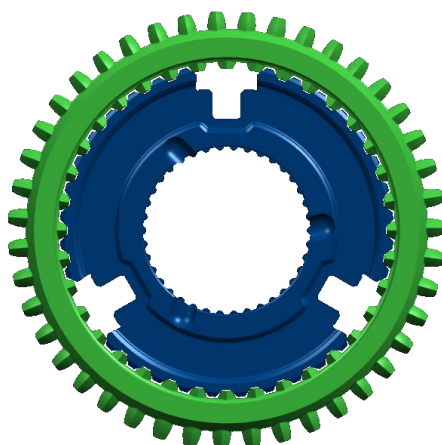


Figura 3. Montagem entre o cubo sincronizador e a luva

A figura 4, a seguir, apresenta o modelo em elementos finitos para avaliação virtual do cubo sincronizador, em que o eixo secundário foi cortado, com suas extremidades restritas em todos os graus de liberdade e o cubo sincronizador que é montado sobre o eixo.

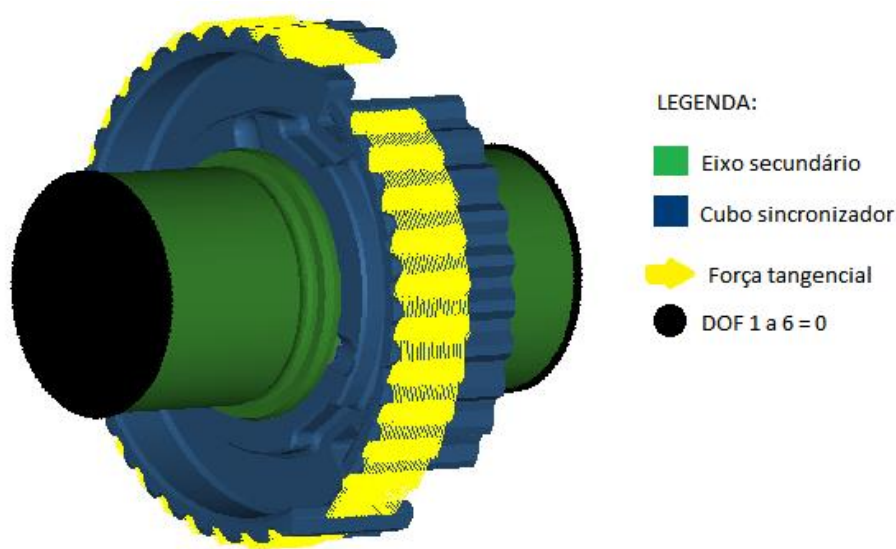


Figura 4. Modelo em elementos finitos

O modelo em elementos finitos foi construído a partir da geometria tridimensional do eixo e do cubo sincronizador. Foi utilizado o software *Hypermesh*, versão v12.0 como pré-processador do modelo em questão.

Para a confecção das malhas, foram utilizados elementos tetraédricos de segunda ordem para os dois componentes, com um total de 655642 elementos, compostos por 619933 nós. A utilização do elemento tetraédrico de segunda ordem para discretização do modelo se justifica pelo fato de a geometria em questão ser de forma irregular. Importante ressaltar que foi considerada não-linearidade geométrica e de material.

A interação entre o cubo e o eixo foi definida através de elementos de contato, os quais possuem propriedades que eliminam interferência ou folga entre os dois componentes. O coeficiente de atrito utilizado foi estimado, com a finalidade de minimizar o escorregamento entre os estriados do cubo e do eixo, permitindo a leitura de resultados de tensão e deformação decorrentes deste contato.

Com o modelos em elementos finitos definido, foi realizada análise estática não-linear, com aplicação da curva de material do aço sinterizado utilizado atualmente no componente em atual produção.

Para o processamento do modelo, foi utilizado o software *Abaqus Standard*, versão 6.12, no módulo implícito, o qual utiliza o método de Newton-Raphson para a solução de convergência.

4 RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO VIRTUAL

A figura 5 mostra o resultado de distribuição de tensão Von Mises sobre o cubo sincronizador. O maior valor obtido na região de interesse corresponde a 53,48% da tensão limite do material adotado. Este resultado está de acordo com o esperado, visto que atende ao critério de escoamento, o que constata que o componente atende às condições de trabalho requeridas a projeto.

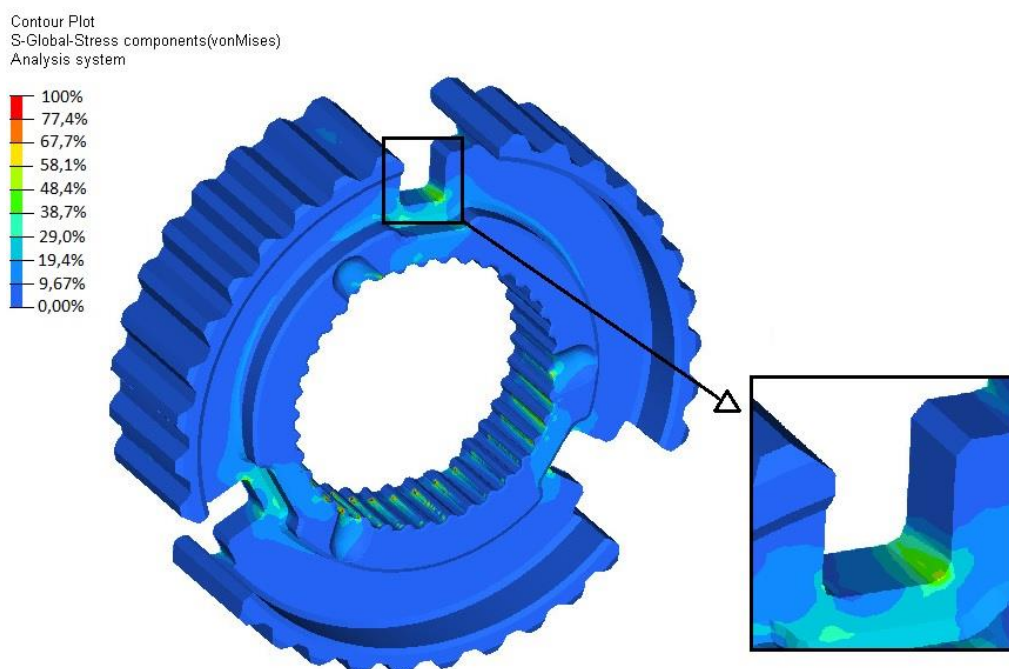


Figura 5. Resultado da Simulação Virtual

Para o pós-processamento do modelo em elementos finitos foi utilizado o software *Hyperview*, versão v12.0.

5 TESTES EXPERIMENTAIS

5.1 Instrumentação do componente

Instrumentar um componente requer a definição dos pontos de maior concentração de tensão na estrutura do mesmo. Neste trabalho, foi utilizada a técnica de medição de deformações conhecida como ponto a ponto, em que foram utilizados extensômetros elétricos de resistência, conhecidos como *strain gages*, do tipo uniaxiais com base isolante de folha. Este extensômetro foi escolhido por apresentar algumas vantagens cruciais para este trabalho:

- apresenta um custo menor;
- menor sensibilidade transversal;
- melhor dissipação térmica, uma vez que o sistema de transmissão junto com o motor é uma fonte de calor;
- melhor desempenho na coleta de dados de deformação em um ponto específico, o que gera resultados mais confiáveis.

5.2 Metodologia

Para o cubo sincronizador de primeira e segunda velocidades, o local de instalação dos *strain gages* foi definido mediante avaliação dos pontos de concentração de tensão verificados na análise numérica. Fisicamente, a instrumentação foi realizada conforme mostra a foto da figura 6.

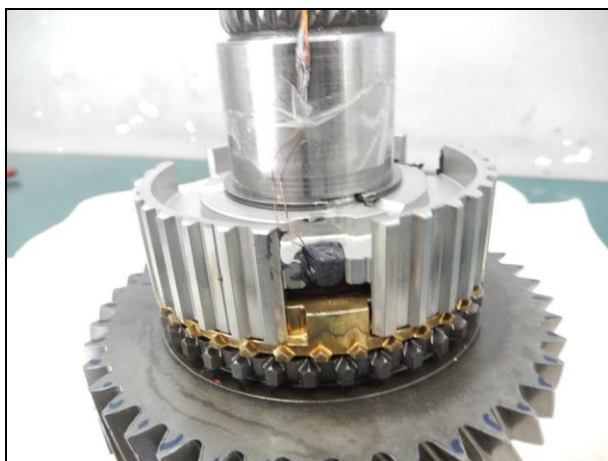


Figura 6. Cubo sincronizador montado no eixo secundário com instrumentação

Para medição do torque real de entrada na caixa de marchas, também foram utilizados *strain gages* para torção, conforme figura 7.

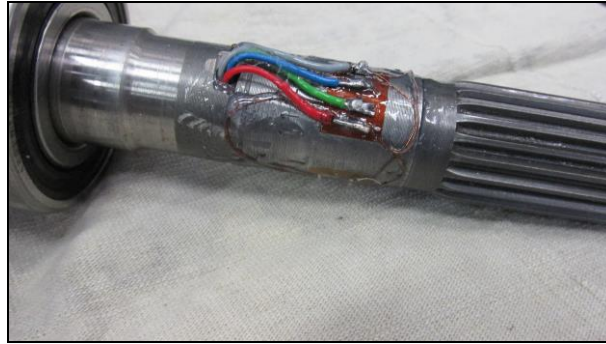


Figura 7. Eixo Piloto instrumentado

Para permitir a coleta dos sinais elétricos por parte dos *strain gages* montados no cubo sincronizador, foi necessária a utilização de um dispositivo chamado de *slip ring*. Este dispositivo é um tipo de *encoder* que permite a captação de sinais elétricos mesmo em componentes que estejam em rotação elevada, sem perda de precisão da medição. O posicionamento deste dispositivo pode ser visto na figura 8.

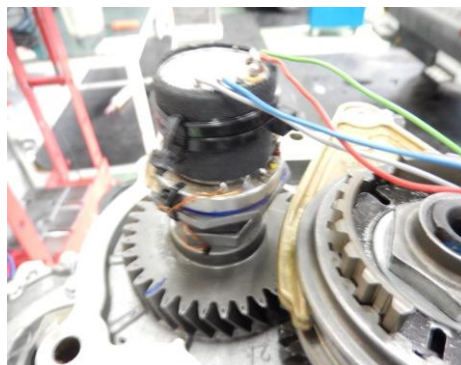


Figura 8. Dispositivo *slip ring* montado para coleta de dados

O cubo sincronizador devidamente instrumentado e montado em um sistema de transmissão veicular manual foi submetido a uma condição de aceleração brusca do veículo, como condição de teste, em que a manobra realizada coloca o cubo sincronizador sob uma condição de carregamento elevado associada a uma aplicação com condição de impacto.

6 RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS

Na figura 9, verifica-se a deformação máxima do cubo sincronizador com valor de 2220 $\mu\text{m/m}$ para um torque de 184,3 Nm no eixo piloto. Neste gráfico, a curva de resultado demonstra um pico de deformação, caracterizando a situação de impacto aplicada no componente.

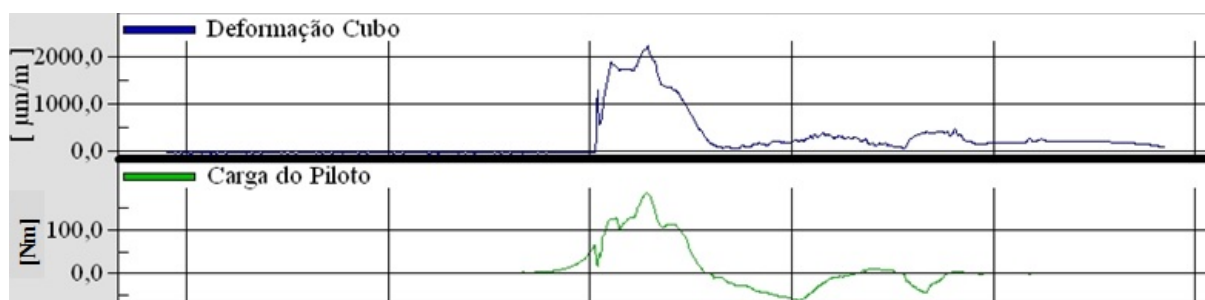


Figura 9. Resultado da deformação e carga de entrada medida no teste experimental

Para efeito de comparação, foi calculada a tensão correspondente a deformação encontrada experimentalmente. Para o valor de deformação medido, a tensão calculada, considerando o material aplicado no componente, corresponde a 51,49% da tensão limite do material.

7 CORRELAÇÃO DE RESULTADOS: MODELO VIRTUAL X TESTES EXPERIMENTAIS

A tabela 1 mostra um comparativo entre os resultados obtidos na simulação virtual e os resultados obtidos nos testes experimentais que avaliaram o cubo sincronizador.

Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos

Torque aplicado	184,3 Nm
Resultado Experimental	51,49%
Resultado Virtual	53,48%

De acordo com a tabela acima, verifica-se que os resultados encontrados nas duas análises são muito próximos, apresentando uma diferença percentual de aproximadamente 4,0%, o qual é um valor razoável para correlação entre os modelos estudados.

8 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na simulação virtual são compatíveis com a realidade, visto que este componente não apresenta problemas estruturais conforme às solicitações de funcionamento requeridas à projeto.

A correlação obtida entre os resultados da simulação virtual e dos testes experimentais demonstra que o modelo virtual apresentado para análise do cubo sincronizador é válido e corresponde com o real funcionamento do componente.

Sendo assim, a análise estrutural virtual pelo método de elementos finitos é parte importante e essencial do projeto de componentes mecânicos, visto que esta metodologia proporciona melhor entendimento do componente, antes que sejam realizados testes experimentais. Outra vantagem é a redução de custos de projeto na etapa de experimentação, visto que esta etapa pode ser limitada a testes mais específicos e mais conclusivos.

Este estudo pode ser complementado considerando o torque em marcha ré como dado de entrada, o que pode trazer mais dados para a validação deste modelo virtual. Também há a possibilidade de realização de cálculos e testes para projeção da vida em fadiga do cubo sincronizador.

9 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FCA Fiat Chrysler Automobiles pela disponibilização de recursos para realização deste trabalho, à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

10 REFERÊNCIAS

ABAQUS/Standard *User Manual*, Version 6.12, 2014.

Alves Filho, Avelino, 2006. *Elementos finitos: a base da tecnologia CAE: análise matricial*. 4ª ed. Érica.

Budynas, Richard G., Nisbett, J. Keith, 2011. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 9th ed. McGraw-Hill.

Chiaverini, Vicente, 2001. *Metalurgia do pó*. 4. ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

Cook, Robert D., Malkus, David S., Plesha, Michael E., Witt, Robert J., 2002. *Concepts and applications of finite element analysis*. 4th ed. John Wiley & Sons.

Godinho, Priscila M., Cunha, Guilherme A., 2013. *Development of a tool to the Speed Hub Structural Virtual Analysis applied to Vehicle Transmissions ordering the component optimization*. SAE Technical Paper Series.

Hoffmann, Karl, 1989. *An introduction to measurements using strain gages*. Damstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.

Lechner, Gisbert, Naunheimer, Harald, 1999. *Automotive transmissions: fundamentals, selection, design and application*. Springer.

Polyanin, Andrei D., Manzhirov, Alexander V., 2007. *Handbook of Mathematics for Engineers and Scientists*. Chapman & Hall/CRC.