

DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO MECÂNICA POR ENGRENAGENS PARA UM PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO OFF-ROAD BAJA SAE

Márcio da Silva Pereira, marcio-silva92@hotmail.com

Kayo Fernando Silva Botão, kayo.botao@gmail.com

Maria de Amália Trindade, amaliatrindade@yahoo.com.br

Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, Curso de Engenharia Mecânica, Av. Lourenço Vieira da Silva, s/n – Campus Universitário Paulo VI, Tiriçal, Cep. 65.055-310, São Luis/MA.

RESUMO: Este trabalho tem o objetivo de apresentar e descrever o desenvolvimento do projeto de um sistema de transmissão mecânica por engrenagens para um protótipo de um veículo *off-road* Baja SAE que irá participar da competição SAE Brasil de Mini Baja. A empresa Bumba Meu Baja foi criada em 2011 e atualmente representa a Universidade Estadual do Maranhão na competição. Buscando a evolução dos seus veículos em relação aos seus concorrentes, decidiu-se pelo emprego de um sistema de redução por engrenagens dispostas em pares e espera-se obter bom desempenho trativo, redução de peso em relação ao sistema anterior e fácil manutenção. O projeto do sistema utilizou metodologias apresentadas na bibliografia consultada e o dimensionamento mecânico das engrenagens seguiu as normas da AGMA. Para a elaboração do trabalho foram usados *softwares* de auxílio como o SolidWorks® e Microsoft Office Excel.

PALAVRAS-CHAVE: transmissão mecânica, engrenagens, Baja

ABSTRACT: *This paper aims to present and describe the development of a mechanical gear transmission for a prototype vehicle off-road Baja SAE that will participate in the SAE Brasil Mini Baja competition. The company Bumba Meu Baja was established in 2011 and currently is the Universidade Estadual do Maranhão's representative in the competition. Seeking the evolution of its vehicles in relation to its competitors, it was decided by employing a system of reduction gears arranged in pairs and are expected to get good tractive performance, weight reduction over the previous system and easy maintenance. The system design used methodologies presented in the literature consulted and the mechanical design of gears followed the standards of AGMA. For the preparation of the work of aid software like SolidWorks® and Microsoft Office Excel were used.*

KEYWORDS: *mechanical transmission, gears, Baja*

INTRODUÇÃO

A SAE International é uma associação mundial sem fins lucrativos quem em mais de 100 anos é a principal fonte de normas e padrões relacionados aos setores automobilístico e aeroespacial. A SAE Brasil, criada em 1991, é filiada a SAE International e possui os mesmos fins e objetivos e constitui-se hoje na mais importante sociedade de engenharia da mobilidade em atividade no Brasil.

O projeto SAE Brasil de Mini Baja iniciou-se em 1995 com o objetivo de lançar um desafio aos estudantes de engenharia de todo o país a conceberem, projetarem, testarem e competirem com veículos *off-road* (fora-de-estrada) dentro de parâmetros pré-definidos como, por exemplo, motor utilizado, tipo de estrutura, etc.

Os estudantes formam equipes que representarão sua Instituição de Ensino Superior e tem que atuar como uma empresa, pois precisam conceber um veículo atraente ao público, levantando recursos financeiros e todas as ferramentas necessárias pertinentes. A empresa Bumba Meu Baja foi criada em 2011 e atualmente representa a Universidade Estadual do Maranhão.

Em seu último protótipo, a empresa utilizou o sistema de transmissão composto por pinhão, coroa e correntes adaptados de motocicletas comerciais devido a seu custo baixo e disponibilidade no mercado. No entanto, a empresa fez um estudo de mercado e constatou que seus concorrentes não utilizavam mais este tipo de transmissão devido, principalmente, a seu peso, pois nesse sistema era necessário o uso de mancais de ferro fundido para fixação dos componentes a estrutura do veículo, o que ocasionava problemas com alinhamento e fixação nos devidos locais de todos os componentes e, por fim, comprometia a manutenção do veículo.

Buscando a evolução dos protótipos, decidiu-se pelo emprego de um sistema de redução por engrenagens dispostas em pares permitindo uma grande relação de transmissão final. Para esta caixa de redução foi determinado que se esperasse obter bom desempenho trativo, redução de peso em relação ao sistema anterior e fácil manutenção.

METODOLOGIA

A metodologia de projetos utilizada durante este trabalho é apresentada em Norton (2013) e é dividida em dez partes: **Identificação da necessidade:**

Aperfeiçoamento do sistema de transmissão perante a evolução do mercado; **Pesquisa de suporte:** para a definição e compreensão completa do problema; **Definição dos objetivos:** Desenvolver e fabricar um sistema de transmissão que proporcione um bom desempenho tratativo, de fácil manutenção, reduzir o peso, projetar e modelar o sistema, simular em software CAD as cargas atuantes e determinar a confiabilidade do sistema; **Especificações de tarefas:** criação de um conjunto detalhado de especificações de tarefas que fecham o problema e limitam o seu alcance; **Síntese:** alternativas possíveis que podem ser utilizadas no projeto (engrenagem cilíndrica de dentes retos - ECDR; engrenagem cilíndrica de dentes helicoidais – ECDH; engrenagem planetária); **Análise:** Aceitação, rejeição ou modificação das alternativas apresentadas na síntese; **Seleção:** Melhor alternativa encontrada para solução do problema levando-se em consideração o custo final, peso, eficiência manutenção preventiva e corretiva fabricação e volume total ocupado; **Projeto detalhado; Protótipo e teste; Produção.**

Para o dimensionamento de engrenagens seguiremos a metodologia apresentada pela AGMA (American Gear Manufacturers Association) (SHIGLEY and MISCHKE, 2005) que publica padrões para projetos, manufatura e montagem de engrenagens e engrenamentos, para definir desgaste das engrenagens e coeficiente de segurança de flexão.

Para o dimensionamento dos eixos de transmissão utilizaremos a equação apresentada em NORTON (2013) para o caso onde a flexão e torção variam, mas não existe força axial.

Procedimento experimental

Para a decisão do tipo de engrenagem a ser utilizado levou-se em conta o custo final de fabricação da caixa (que teria de ser feita por uma empresa), peso final do conjunto, eficiência, manutenção preventiva, manutenção corretiva, fabricação e volume total ocupado. Foi utilizada uma matriz de tomada de decisões para melhor visualização dos critérios:

Tabela 1. Matriz de tomada de decisão

Critérios e Descrição	Peso	Engrenagem de Dentes Retos		Engrenagem de Dentes Helicoidais	
		Nota	Ponderação	Nota	Ponderação
Custo	3	3	9	1	3
Peso	3	5	15	5	15
Eficiência	4	4	16	5	20
Manutenção preventiva	3	5	15	5	15
Manutenção corretiva	4	2	8	1	4
Fabricação	3	2	6	1	3
Volume ocupado	5	5	25	5	25
TOTAL			94		85

Com base no resultado dessa matriz de tomada de decisões, foi determinado que a caixa de redução seria fabricada com engrenagens cilíndricas de dentes retos. Para a definição da relação de transmissão final adotou-se que a velocidade final teórica seria de 58 Km/h e o emprego de um CVT (Continuous Variable Transmission) para eliminar o uso de câmbio de marchas. A CVT possui sua relação de transmissão mínima de 0,69:1 e máxima de 3,71:1. Para determinarmos a relação final de transmissão utilizamos a Eq. (1):

$$\text{Relação Final} = \frac{\text{rotação do motor (rpm)} \cdot \pi \cdot \text{diâmetro do pneu (m)}}{60 \cdot \frac{\text{velocidade final (Km/h)}}{3,6}} \quad (1)$$

A rotação máxima do motor é de 3800 rpm e o diâmetro do pneu é de 21” (0,5334 m) logo a relação final é de 6,59:1. A relação final da caixa de transmissão é obtida dividindo-se a relação final pela relação final da CVT, obtendo-se o valor de 9,55.

De acordo com a relação final da caixa, podemos escolher os pares de engrenagens por tentativa e considerando o fenômeno de interferência por engrenagens que atendam a esta relação (Eq. (2))

$$\text{Relação de transmissão} = \frac{C_1 \cdot C_2}{P_1 \cdot P_2} = \frac{60 \cdot 64}{20 \cdot 20} = 9,6 \quad (2)$$

Dimensionamento das engrenagens

Posteriormente a definição do número de dentes de cada engrenagem, pode-se iniciar os cálculos das engrenagens seguindo o método da AGMA (SHIGLEY and MISCHKE, 2005) para os dois pares. O material empregado é o aço SAE 4340 devido, ao seu peso em relação ao volume total ocupado, além da elevada resistência à fadiga e homogeneidade de dureza ao longo da seção. Levou-se em consideração que os valores de coeficiente de segurança, para cada engrenagem, fossem no mínimo de 1,5. Os dados de entrada para o dimensionamento estão listados na tabela abaixo:

Tabela 2. Dados de entrada para o dimensionamento das engrenagens

Especificações	Valores
Potência do Motor	10 HP (7,46 KW)
Torque Máximo (@ 2600 RPM)	18,6 N.m
Rotação Máxima do Motor	3800 RPM
Rotação Máxima na entrada da caixa (devido a CVT)	5507.25 RPM
Módulo da engrenagem	2,5 mm

Em seguida, aplicaram-se as variáveis nas equações para dimensionamento e obtiveram-se os resultados que são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 3. Diâmetros primitivo e externo e Tensões de flexão e contato para cada engrenagem

	Pinhão de 20 dentes	Coroa de 60 dentes	Pinhão de 20 dentes	Coroa de 64 dentes
Diâmetro primitivo	50 mm	150 mm	50 mm	160 mm
Diâmetro externo	55 mm	155 mm	55 mm	165 mm
Tensão de Flexão	373,32 MPa	373,32 MPa	298,46 MPa	298,46 MPa
Tensão de Contato	698,24 MPa	349,12 MPa	513,52 MPa	287,06 MPa

Dimensionamento dos eixos

O projeto dos eixos começa com a definição das variáveis que são utilizadas para determinar o seu diâmetro. NORTON (2013) apresenta a Eq. (3) para o eixo que é submetido a valores de flexão e torção variáveis, mas não existe força axial.

$$d = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\frac{\sqrt{(k_f M_a)^2 + \frac{3}{4}(k_{fs} T_a)^2}}{S_f} + \frac{\sqrt{(k_{fm} M_m)^2 + \frac{3}{4}(k_{fsm} T_m)^2}}{S_{ut}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

O dimensionamento dos eixos necessita da descrição do coeficiente de segurança do projeto pois não é conhecido os picos de tensão que atuarão sobre o eixo. Escolheu-se o fator de segurança, N_f , como 2,5. Com estas variáveis resolvidas pode-se determinar os diâmetros dos três eixos empregados na caixa de redução. Para algumas seções, apesar dos valores dos diâmetros serem determinados, optou-se por outros valores devido aos acoplamentos CVT-eixo, por exemplo, já possuem valores comerciais fixos.

As forças atuantes nos eixos também foram determinados, através dos esforços que as engrenagens causam, podendo assim selecionar os rolamentos comerciais que satisfazem esses valores.

Na Tabela (4) são mostrados os resultados das dimensões calculadas e as dimensões definidas por razões comerciais.

Tabela 4. Dimensões calculadas para as seções dos eixos 1, 2 e 3

EIXOS	Valor	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)
Eixo 1	Calculado	14,22	-
	Adotado	25	-
Eixo 2	Calculado	15,12	15,19
	Adotado	20	20
Eixo 3	Calculado	20	-
	Adotado	25	-

A Figura (1) ilustra o projeto final da caixa construído no *software* de modelagem 3D SolidWorks®.

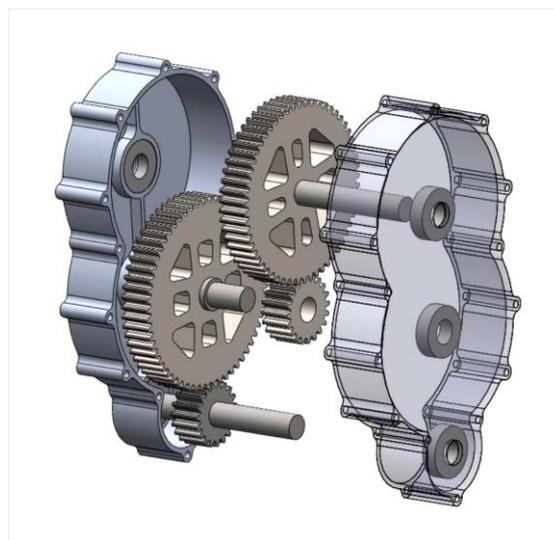


Figura 1. Esquema simplificado da caixa de engrenagem

Após a etapa de projeto detalhado passou-se a confecção do protótipo da caixa de redução que foi fabricada por uma empresa contratada. A usinagem das peças foram feitas de acordo com os desenhos de fabricação e tolerâncias estipulados durante o projeto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em posse da caixa, foram realizados testes onde foi observado que o veículo atinge a velocidade final de aproximadamente 55 Km/h. Esse resultado é inferior a velocidade final teórica devido as perdas durante o engrenamento e deslizamento entre o rolamento e o mancal. Mas ao final deste projeto aumentamos a eficiência do sistema de 95% para 97%.

CONCLUSÃO

Ao fim deste trabalho devem ser ressaltados os benefícios adquiridos com a realização desse projeto que desenvolveu as capacidades técnicas e metodológicas através do uso de conhecimentos adquiridos durante a formação acadêmica de engenheiro mecânico e atividades extracurriculares, tais como a competição SAE Baja.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Deus, primeiramente, a Universidade Estadual do Maranhão por todo o apoio concedido para a realização do projeto e também a Antônio Marcos Silva por todo o suporte e esclarecimento.

REFERÊNCIAS

MELCONIAM, Sarkis. Elementos de Máquinas. Editora Érica, São Paulo, 2000.

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. 2ª Edição. Editora ArtMed, São Paulo, 2013.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Projeto de Engenharia Mecânica . 7ª edição. Editora ArtMed. São Paulo. 2005.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos nesse trabalho.