

DESENVOLVIMENTO DE UM WEBSITE PARA O DIMENSIONAMENTO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS

Lúcio Flávio Souza Oliveira

Vinicius Antônio Cardoso Mendes

UFPB – Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, João Pessoa – PB

luciooliveira_@hotmail.com

vinicius.acmendes@outlook.com

José Carlos De Lima Junior

João Bosco de Aquino Silva

UFPB – Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, João Pessoa – PB

limajrcarlos@hotmail.com

joao.bosco@academico.ufpb.br

Resumo: Engrenagens são mecanismos de transmissão de movimento rotacional que consistem de rodas dentadas de diferentes tamanhos e que se encaixam entre si. São usadas não só para transferir movimento entre eixos como também para mudar a velocidade e direção do movimento, e variar a proporção entre a velocidade de entrada e saída. Elas podem ser usadas em muitos dispositivos, como redutores de velocidades, automóveis, máquinas agrícolas, máquinas industriais e até relógios. O projeto desses elementos é um processo complexo e, por vezes, lento, uma vez que deve-se levar em consideração diversos fatores, tais como: estimar a carga aplicada no dente; definir o módulo a ser utilizado, calcular as tensões de contato e de flexão; determinar os fatores de segurança; além de definir o material empregado e os tratamentos térmicos utilizados. Nesse sentido, devido à grande demanda aliada à complexidade dos projetos de engrenagens, este artigo teve como objetivo geral o desenvolvimento de um website para o projeto de um par de engrenagens cilíndricas de dentes retos – ECDR, visando não só facilitar a rotina dos estudantes e profissionais da área, de forma a otimizar o seu tempo e direcioná-lo para tarefas mais importantes, mas também minimizar os erros, que porventura, possam ser ocasionados nos cálculos das ECDR's. O desenvolvimento deste trabalho foi dividido nos seguintes procedimentos metodológicos: (a) levantamento bibliográfico sobre o dimensionamento de engrenagens; (b) codificação do protótipo do website; (c) testes e validação do protótipo. Os resultados mostraram que o website foi desenvolvido de forma eficaz, com um design intuitivo, de modo que foi capaz de atender às necessidades dos usuários, fornecendo aos mesmos, resultados precisos e confiáveis do dimensionamento das engrenagens cilíndricas de dentes retos. Dessa forma, pode-se afirmar com base nos resultados apresentados, que o website desenvolvido é uma ferramenta útil e simplificada para o projeto desses elementos mecânicos.

Palavras-chave: ECDR; Website; Dimensionamento.

1. INTRODUÇÃO

O projeto de engenharia pode ser definido como um processo interativo de tomadas de decisões com o objetivo de criação ou otimização de um sistema de engenharia ou produto (Collins, 2019). E nesse sentido, o produto deve ser funcional, seguro, confiável, competitivo, e próprio para ser usado, fabricado e comercializado (Budyns e Nisbett, 2016).

De acordo com Rodrigues (2021), o ganho de vantagem competitiva de uma empresa está diretamente relacionado à sua capacidade de identificar oportunidades e de desenvolver produtos que se destaquem no atendimento das necessidades de seus clientes. Nesse contexto, observando a carência de produtos que auxiliem os estudantes de engenharia e profissionais da área no projeto de engrenagens cilíndricas de dentes retos – ECDR, foi assentado pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba desenvolver um website para o dimensionamento desses elementos.

Atualmente, como a internet possibilita um fluxo incalculável de dados, por meio das novas tecnologias de informação, o fluxo quase instantâneo desses vêm permitindo às empresas não só melhorar a sua eficiência, mas, fundamentalmente, oferecerem novos produtos e serviços (Silva, 2013), foi desenvolvida uma ferramenta no ambiente web, visando facilitar o acesso aos cálculos necessários para a seleção de engrenagens de forma simples e rápida, tornando-o um ferramenta de consulta para profissionais e estudantes que trabalham com projetos de engrenagens.

As engrenagens, hoje em dia, são altamente padronizadas com relação à forma do dente e ao tamanho. A American Gear Manufacturers Association (AGMA) apoia a pesquisa sobre o projeto, os materiais e a manufatura de engrenagens

e publica padrões para seu projeto, manufatura e montagem (Norton, 2013). Nesse sentido, por ela ser, por vários anos, a autoridade responsável pela disseminação do conhecimento pertinente ao projeto e à análise de engrenagens (Budynas e Nisbett, 2016), faremos uso dos seus critérios de dimensionamento.

O primeiro critério é da tensão de flexão, ele verifica se as tensões de trabalho, na raiz do dente, são superiores às tensões admissíveis (Juvinall e Marshek, 2016). Esse critério é baseado nos estudos de Wilfred Lewis, que introduziu uma equação para estimar a tensão de flexão em dentes de engrenagens, anunciada em 1982, ela permanece como base para os projetos da maioria das engrenagens atuais (Budynas e Nisbett, 2016). Já o segundo, é do desgaste superficial, ele verifica se a tensão de contato excede à resistência ao desgaste superficial do material. A teoria de Hertz tem sido empregada neste último.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de uma plataforma que auxilie estudantes e projetistas mecânicos no dimensionamento de engrenagens. Plataforma esta que deve ser de fácil acesso e que tenha uma interface amigável, além de proporcionar uma excelente experiência ao usuário. Portanto, a internet é uma alternativa eficaz, haja vista que está amplamente difundida na sociedade brasileira e é uma das ferramentas mais utilizadas atualmente no desenvolvimento de produtos e serviços de alta demanda.

Logo, para que o objetivo geral fosse obtido, os seguintes objetivos específicos foram realizados: (a) levantamento bibliográfico sobre o projeto de engrenagens, principalmente das normas: AGMA 908-B89, ANSI/AGMA 2000-D04 e ANSI/AGMA 2001-D04; (b) codificação do protótipo do website, desenvolvimento do projeto visual e da estrutura para o website; (c) testes e validação do protótipo, realização de testes para verificar a aparência, o comportamento e o funcionamento do website, certificando que tudo está em conformidade.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada obedeceu a seguinte sequência: (a) Planejamento: estabelecer os objetivos e metas para o website, definir o público-alvo, escolher as tecnologias e plataformas, criar um cronograma para os trabalhos e realizar o levantamento bibliográfico; (b) Design e Desenvolvimento: desenvolver um projeto visual e estrutura para o website, incluindo cores, fontes, imagens e navegação; construindo-o de acordo com o design, codificar o HTML, o JavaScript e o CSS; (c) Testes: realizar testes para verificar a aparência, o comportamento e o funcionamento do website, certificando que tudo está em conformidade com o design. Na Figura 1 são apresentadas as etapas desenvolvidas para que os objetivos específicos fossem alcançados.

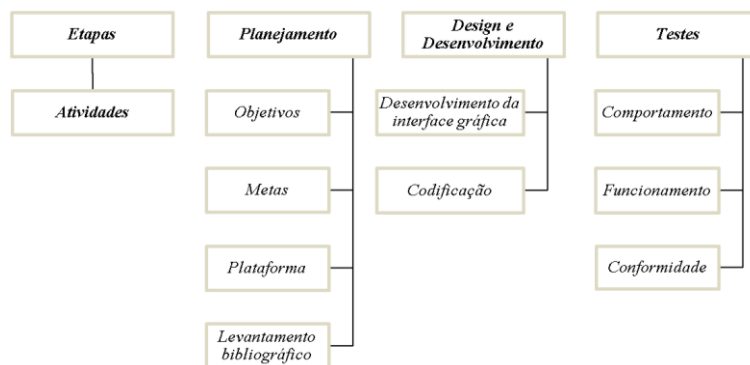


Figura 1 - Etapas de desenvolvimento do website (Próprio autor, 2023)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a aplicação da metodologia descrita, foram obtidos resultados referentes: (a) análise geométrica; (b) análise cinemática e dinâmica; (c) análise de tensões. Os resultados dessas análises são imprescindíveis no projeto das ECDR's. Esses resultados estão disponíveis tanto no Sistema Internacional de Unidades (SI) quanto no Sistema Americano, no entanto, para efeitos de arguição será utilizado apenas o Sistema Americano. Nesse sentido, esta seção apresenta o desenvolvimento e a concepção do website, assim como a exatidão dos seus resultados.

3.1. Apresentação do website

O website está dividido em quatro partes ou janelas, interligadas e dependentes entre si. Essas divisões são necessárias, uma vez que se deseja fazer um estudo sistemático e metódico do par de engrenagens. Nesse sentido, ao dividir o site em partes ou fases, o usuário terá maior facilidade na visualização, manipulação e interpretação das informações da página web. Como essa página foi construída em cascata, o usuário da página somente poderá avançar no seu estudo caso tenha realizado o estudo preliminar.

3.2. Estudo geométrico

A análise geométrica do dentado de uma engrenagem consiste em determinar os seus dados construtivos, como módulo normal, ângulo de perfil, ângulo de hélice sobre o diâmetro de referência, além de todas as demais características necessárias para um desenho completo do dentado (Mazzo, 2013). Portanto, o objetivo dessa análise é garantir que as engrenagens estejam em conformidade com as especificações de projeto e, dessa forma, fornecer um funcionamento suave e confiável. Nessa análise, há cinco parâmetros, dos quais o usuário deve, obrigatoriamente, escolher dois. Os parâmetros apresentados são: número de dentes das engrenagens, pinhão (z_1) e coroa (z_2); diâmetro primitivo do pinhão (d_1), diâmetro primitivo da coroa (d_2); e a relação de transmissão (i). Nesse sentido, há um total de oito combinações possíveis para se realizar a análise, como pode ser visto na Eq. (1).

$$C_{n,k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} - 2 \rightarrow C_{5,2} = \frac{5!}{2!(5-2)!} - 2 \leftrightarrow C_{5,2} = 8 \quad (1)$$

Em que: (n) – número total de parâmetros e, (k) – número de parâmetros selecionáveis. Além desses parâmetros, o usuário deverá selecionar mais quatro, que são: passo diametral (P_d); o ângulo de pressão (Φ), o fator de modificação do adendo (x) e o fator de altura do dente (k_a). Normalmente, o fator de modificação do adendo é nulo, mas em casos que o pinhão tem um pequeno número de dentes e a coroa um grande número de dentes, para se evitar o fenômeno da interferência, altera-se esse fator. Ao inserir os parâmetros, o usuário deve clicar no botão “Calcular” para que a página forneça o resultado do estudo. Além dos parâmetros citados acima, o resultado traz ainda o diâmetro externo (d_e), diâmetro interno ou de raiz (d_r), altura do dente (h_t), adendo (a), dedendo (b). Apresenta, ainda, os resultados da espessura circular do dente (s_t) e dos passos circular (p_c) e de base (p_b), conforme a Fig. 2.

Figura 2 – Resultado do exercício 13.4 (Próprio autor, 2023)

Para verificar a exatidão dos resultados, iremos comparar os resultados obtidos pela página com os resultados do exercício 13.4 do livro Elementos de Máquinas de Shigley, 10ª ed.

Descrição do problema: Um pinhão cilíndrico de dentes retos com 21 dentes engraniza com uma coroa de 28 dentes. O passo diametral é de 3 dentes/in, e o ângulo de pressão vale 20°. Encontre e tabule os seguintes resultados: adendo; dedendo; passo circular; espessura dos dentes; diâmetros dos círculos de base; passo de base.

Tabela 1 – Comparação da análise geométrica do exercício 13.4 (Próprio autor, 2023)

Parâmetros	Shigley		Site		Unidade
	Pinhão	Coroa	Pinhão	Coroa	
adendo (a)	0,3333		0,33		in
dedendo (b)	0,4167		0,42		in
passo circular (p_c)	1,047		1,05		in
espessura do dente (s_t)	0,523		0,52		in
diâmetros primitivos (d)	7,0	9,333	7,00	9,33	in
diâmetros de base (d_b)	6,578	8,77	6,58	8,77	in
passo de base (p_b)	0,984		0,98		in

A partir da Tabela 1 é possível constatar a exatidão dos resultados da análise geométrica. Na Figura 2 é possível verificar que o botão “Cinemático/Dinâmico” foi habilitado. A partir deste momento, o usuário pode realizar esse estudo, caso necessite. Se as engrenagens apresentarem interferência, um alerta será apresentado ao usuário, conforme a Fig. 3 (esquerda). Outro efeito que deve ser evitado segundo Filho (2017), é o uso de uma relação de transmissão maior do que 8. Caso isso ocorra, será apresentado um novo alerta ao usuário, conforme a Fig. 3 (direita).



Figura 3 – Mensagens de alerta para quando há interferência (esquerda) e para quando a relação de transmissão é maior do que a recomendada, $i > 8$ (direita) (Próprio autor, 2023)

3.3. Estudo cinemático e dinâmico

De acordo com Norton (2010), cinemática é o estudo do movimento, desconsiderando as forças que o causaram. Nesse sentido, a análise cinemática é a prática de estudar o movimento de sistemas mecânicos. Ela determina a forma como os componentes se movem e interagem uns com os outros dentro do sistema, sendo necessária para projetar sistemas mecânicos eficientes. Um dos principais objetivos da cinemática é criar (projetar) movimentos desejados de elementos mecânicos e então calcular as posições, velocidades e acelerações que esses movimentos irão gerar nos respectivos componentes (Norton, 2010). Outrora, a análise dinâmica de engrenagens diz respeito ao estudo das forças que atuam nas engrenagens, ela envolve a aplicação das três leis de Newton. Para a realização do estudo cinemático e dinâmico, o usuário deverá clicar em estudo “Cinemático/Dinâmico”. Após esse evento, aparecerão em sua tela os parâmetros cinemáticos a serem escolhidos. Tais parâmetros são: rotação do pinhão (n_1), rotação da coroa (n_2); torque no pinhão (T_1), torque na coroa (T_2); e Potência transmitida (P_{trans}). Como o site foi desenvolvido para os dois sistemas de unidades mais usuais, as unidades que poderão ser inseridas para a potência transmitida são o: Watt (W), kiloWatt (kW), cavalo-vapor (cv) e o horsepower (hp). Já para o torque transmitido tem-se as seguintes unidades: Newton-metro (N·m) e a libra-força polegada (lbf·in).

Da mesma maneira da análise geométrica, o usuário deve escolher dois dos cinco parâmetros disponíveis, portanto, conforme visto anteriormente, há oito combinações possíveis. Ao inserir os parâmetros, o usuário deve clicar no botão “Calcular” para que a página forneça o resultado do estudo. Além dos parâmetros acima, é possível também obter as forças: tangencial (W_t), radial (W_r) e resultante (W), atuante nas engrenagens. Para verificar a exatidão dos resultados, iremos comparar os resultados obtidos pela página com os resultados do exercício 13.37 do livro Elementos de Máquinas de Shigley, 10ª ed, conforme as Fig. 4 e Fig. 5.

Descrição do problema: Uma caixa de engrenagens de redução de velocidades contendo um trem de engrenagens composto reverso transmite 35hp com uma velocidade de entrada de 1200 rev/min. São utilizadas engrenagens cilíndricas de dentes retos com ângulos de pressão de 20° e um passo diametral de 10 dentes/in, com 16 dentes em cada uma das engrenagens pequenas e 48 dentes em cada uma das engrenagens maiores. Encontre e tabule os resultados de: velocidades e torque dos eixos; intensidade das forças que atuam nas engrenagens.

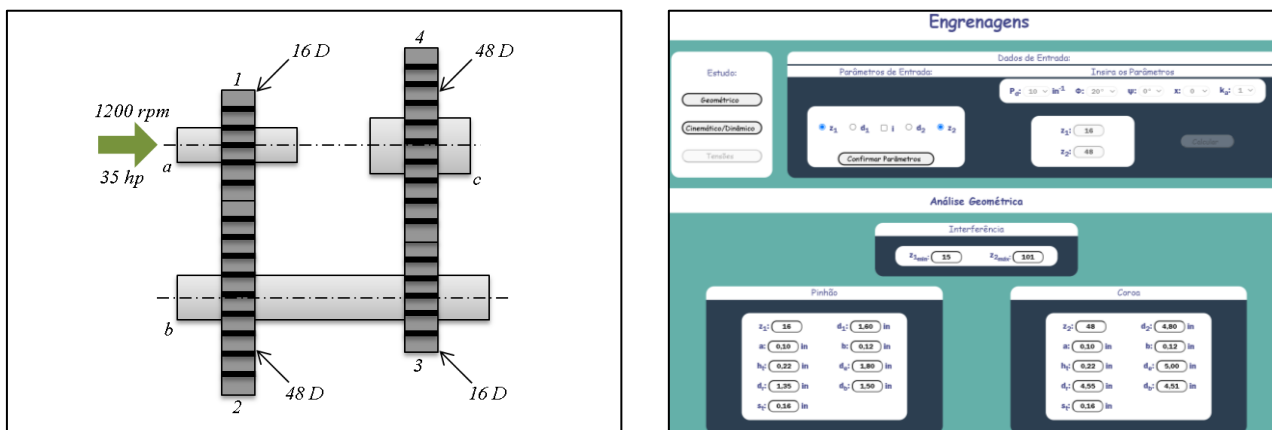


Figura 4 - Esquema gráfico do exercício 13.37 (esquerda) e análise geométrica (Próprio autor, 2023)



Figura 5 – Análise cinemática e dinâmica do exercício 13.37, par de eng. (1,2) (esquerda) e par de eng. (3,4) (direita) (Próprio autor, 2023)

Tabela 2 – Comparação da análise cinemática do exercício 13.37 (Próprio autor, 2023)

Parâmetros	Shigley			Site			Unidade
	eixo (a)	eixo (b)	eixo (c)	eixo (a)	eixo (b)	eixo (c)	
velocidade do eixo (n)	1200	400	133,3	1200	400	133,3	rpm
torque no eixo (T)	1838	-	16540	1838,24	5514,72	16544,16	lbf·in

Tabela 3 – Comparação da análise dinâmica do exercício 13.37 (Próprio autor, 2023)

Parâmetros	Shigley		Site		Unidade
	par de engrenagens		par de engrenagens		
	(1,2)	(3,4)	(1,2)	(3,4)	
força normal (W)	2445	7333	2445,27	7335,80	lbf
força radial (W_r)	836,4	2508	836,33	2508,99	lbf
força tangencial (W_t)	2298	6891	2297,80	6893,40	lbf

A partir da Tabela 2 e Tabela 3 é possível constatar a exatidão dos resultados das análises cinemática e dinâmica, uma vez que os resultados tanto da referência quanto do produto desenvolvido estão coerentes. Na Figura 5, é possível verificar que o botão “Tensões” foi habilitado, isso ocorre, pois, uma vez realizado os estudos geométrico, cinemático e dinâmico, todas as informações necessárias para se fazer o estudo do dimensionamento das engrenagens já foram coletadas. A partir deste momento, o usuário, se necessitar, pode realizar esse estudo. Segundo Filho (2017), as ECDR têm limitações em relação à transmissão de potência, não devendo exceder 25.000 cv. Nesse sentido, quando o usuário, em seu projeto, tem a necessidade de que a potência transmitida pelas engrenagens seja superior à recomendada, o sistema emite um alerta, conforme a Fig. 6. No entanto, o sistema não impede o projetista ter acesso ao resultado dos cálculos, ficando a critério dele, seguir essa recomendação ou não.

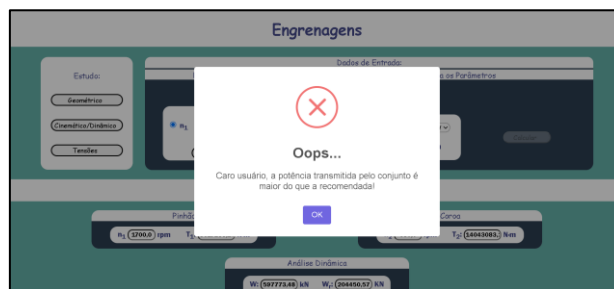


Figura 6 – Mensagens de alerta emitindo a mensagem de que a potência transmitida pelas ECDR é superior à recomendada por Filho (2017) (Próprio autor, 2023)

3.4. Estudo de tensões

A AGMA foi fundada com o objetivo de melhorar a qualidade, o desempenho e a segurança das engrenagens produzidas nos Estados Unidos. Ela atua para promover, desenvolver e aprimorar as tecnologias de engrenagens para todas as indústrias relacionadas, atuando ainda, como provedora de informações e recursos técnicos para fabricantes, fornecedores e usuários de engrenagens (Norton, 2013). Tendo em vista que ela é uma referência em termos de pesquisa, inovação, desenvolvimento e normativo de engrenagens, o presente trabalho foi desenvolvido seguindo as suas recomendações. Como citado anteriormente, a AGMA apresenta dois critérios para o dimensionamento de

engrenagens: (a) o de flexão; (b) o de contato. O primeiro critério é baseado na equação de Wilfred Lewis, apresentada em 1982. Essa equação ainda é utilizada nos dias atuais, no entanto, a AGMA utiliza fatores de modificação de tensão, de modo a considerar os efeitos dinâmicos, precisão na fabricação, divisão da carga entre os dentes em contato (razão de contato), concentração de tensões, choque entre os dentes e rigidez na montagem (Marcos, 1999). Nesse sentido, a tensão de flexão é dada pela Eq. (2). Já o segundo critério tem como base os estudos de Heinrich Hertz e, verifica se a tensão de contato excede a tensão de contato admissível do material correspondente a um dado número de ciclos (Marcos, 1999). A AGMA determina a tensão de contato de acordo com a Eq. (3).

$$s_t = W_t \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_s \cdot \frac{1}{F \cdot P_d} \cdot \frac{K_m \cdot K_B}{J} \quad (2)$$

$$s_c = C_p \cdot \sqrt{W_t \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_s \cdot \frac{k_m}{d_1 \cdot F} \cdot \frac{C_f}{I}} \quad (3)$$

Em que: (s_t) – tensão de flexão; (K_o) – fator de sobrecarga; (K_v) – fator dinâmico; (K_s) – fator de tamanho; (K_m) – fator de distribuição de carga; (K_B) – fator de espessura de borda; (F) – largura de face; (J) – fator geométrico de resistência à flexão; (s_c) – tensão de contato; (C_p) – coeficiente elástico; (C_f) – fator de condição de superfície; (I) – fator geométrico de resistência ao contato.

O fator geométrico de resistência à flexão, o fator geométrico de resistência ao contato e o coeficiente elástico são determinados a partir da Eq. (4), Eq. (5) e Eq. (6), respectivamente.

$$J = \frac{Y \cdot C_\psi}{K_f \cdot m_N} \quad (4)$$

$$I = \frac{\cos(\phi_r) \cdot C_\psi^2}{\left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}\right) \cdot d_1 \cdot m_N} \quad (5)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \left[\left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]}} \quad (6)$$

Em que: (Y) – fator de forma do dente; (C_ψ) – fator de sobreposição helicoidal; (K_f) – fator de concentração de tensão; (m_N) – razão de compartilhamento de carga; (ϕ_r) – ângulo de pressão operacional; (ρ) – raio de curvatura do perfil do dente no ponto da tensão de contato, (ν) – coeficiente de Poisson, (E) – módulo de elasticidade. (1) – pinhão, (2) – coroa.

Além do cálculo das tensões, o produto de engenharia desenvolvido se propõe a calcular as tensões admissíveis e os fatores de segurança das engrenagens. Enquanto as tensões admissíveis de flexão são as máximas tensões que as engrenagens podem suportar sem que haja deformações plásticas ou ruptura dos seus dentes; As tensões admissíveis de contato são as máximas tensões que as engrenagens podem suportar sem que haja formação de microcrateras na face de trabalho dos seus dentes. Nesse sentido, elas são entendidas como os valores limites para as tensões de trabalho. As tensões admissíveis de flexão e de contato podem ser determinadas a partir da Eq. (7) e Eq. (8), respectivamente.

$$s_{t_{adm}} = \frac{s_{at} \cdot Y_N}{S_F \cdot K_T \cdot K_R} \quad (7)$$

$$s_{c_{adm}} = \frac{s_{ac} \cdot Z_N \cdot C_H}{S_H \cdot K_T \cdot K_R} \quad (8)$$

Em que: (s_{tadm}) – tensão admissível de flexão; (Y_N) – fator de ciclo de flexão; (S_F) – fator AGMA de segurança à flexão; (K_T) – fator de temperatura; (K_R) – fator de confiabilidade; (s_{cadm}) – tensão admissível de contato; (Z_N) – fator de ciclo ao contato; (C_H) – fator de razão de dureza para resistência ao crateramento; (S_H) – fator AGMA de segurança ao contato.

O usuário deve definir os seguintes parâmetros para que seja possível a resolução da análise de tensões. Nesse sentido, conforme pode ser visto na Fig. 9 e Fig. 10, esses parâmetros são: largura de face das engrenagens, pinhão (F_1) e coroa (F_2); qualidade do engrenamento (Q_v); perfil do dente, condição e ajuste do engrenamento; diâmetro dos eixos que acoplam ao pinhão (d_{o1}) e à coroa (d_{o2}); número de ciclos (N), tempo de vida útil (L) ou fator de segurança à flexão (S_F) e ao contato (S_H) do engrenamento; material das engrenagens: ao se clicar em “lista de materiais”, será apresentada uma lista dos materiais mais utilizados na produção de engrenagens. O usuário deve dar um duplo click no material escolhido e especificar a sua dureza para selecioná-lo. Desse modo, o projetista tem acesso a mais de cem materiais para a produção de suas engrenagens; confiabilidade do sistema. Ao inserir os parâmetros, o usuário deve clicar no botão “Calcular” para que a página forneça o resultado do estudo. Para verificar a exatidão dos resultados, iremos comparar os resultados obtidos pela página com os resultados do estudo de caso 12.12 do livro Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada, 4ª ed, conforme as Fig. 8 à Fig. 10.

Descrição do problema: Projete um par de engrenagens retas para o redutor de compressor da Fig. 9 (esquerda), a função torque-tempo do eixo de saída é mostrada na Fig. 9 (direita). A razão de engrenamento requerida é uma redução de 2,5:1 na velocidade desde o eixo de entrada ao eixo de saída; A velocidade desse eixo é de 1500 rpm; Deseja-se uma vida de 10 anos para um turno de operação; Serão utilizados dentes de profundidade completa padronizados pela AGMA; O padrão de qualidade é N° 10. Tanto o pinhão quanto a engrenagem serão de aço endurecido completamente com dureza de 250 HB.

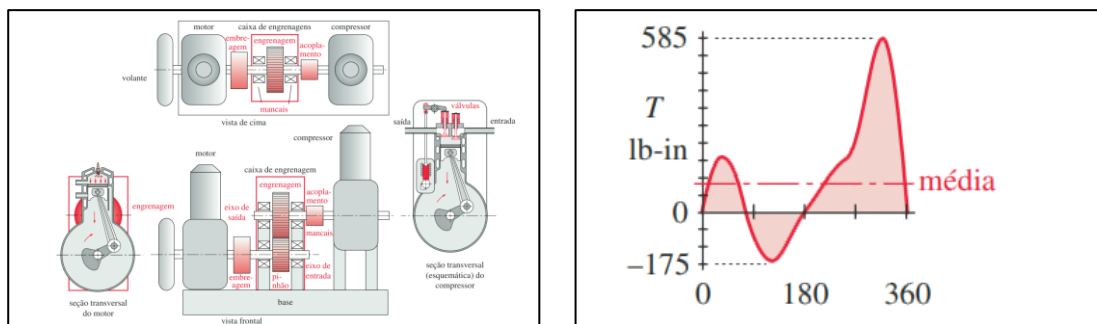


Figura 7 – Desenho esquemático de um compressor de ar portátil (esquerda) e uma função torque-tempo no eixo manivela do compressor (direita) (Norton, 2013)



Figura 8 – Análise geométrica do estudo de caso 12.12 (esquerda) e a análise cinemática e dinâmica do estudo de caso 12.12 (direita) (Próprio autor, 2023)

É possível verificar a partir da Tab. 4 que há uma discrepância de 13% no valor da tensão de flexão do pinhão e de 14% da coroa. Isso ocorre, pois, o método de cálculo do fator de distribuição de carga que o livro utiliza é diferente do utilizado pela AGMA. O mesmo ocorre com o fator dinâmico, mas isso não influencia no resultado final uma vez que o autor utiliza esse fator no denominador da equação da tensão e dessa forma os resultados finais são semelhantes. Caso adotássemos o método de cálculo utilizado pelo autor para o fator de distribuição de carga, a discrepância entre o valor da tensão de flexão do pinhão ficaria em torno de 5% e, da coroa 4,5%.

Engrenagens

Estudo:

Geométrico

Cinemática/Dinâmica

Tensões

Flexão

Contato

Insira os Parâmetros:

Tensão:

Largura de face - F

F_1 : 2.4 in F_2 : 2.4 in

Qualidade do engrenamento - Q_v : 10

Fator de sobrecarga - K_o

Máquina acionada

Fonte de potência

uniforme

choque moderado

choque intenso

Fator de distribuição de carga - K_m

Perfil do dente: Perfil em conformância

Condição do engrenamento: Engrenamento aberto

Ajuste do engrenamento: Outras condições de ajustes



Fator de espessura de borda - K_b

d_{a1} : in d_{a2} : in

Ponto de Aplicação da carga

LAT ☐ HPSTC

Calcular

Resistência:

Parâmetros de Entrada:

☒ N ☐ L_h ☐ S_F

Número de ciclos - N

N : 4.7e9

Resistências do Material - S_{at} e S_{se}

Selecionar Material

Fator de confiabilidade - K_R

Confiabilidade: 99%

Análise de Tensões - Flexão

Fatores do Pinhão - flexão

K_{f1} : 2.00 K_{f2} : 1.25

K_{s1} : 1.00 K_{s2} : 1.34

K_{b1} : 1.00 J : 0.32

Fatores da Coroa - flexão

K_{f1} : 2.00 K_{f2} : 1.25

K_{s1} : 1.00 K_{s2} : 1.33

K_{b1} : 1.00 J : 0.38

Fatores do Pinhão - resistência

S_{at} : 31970 psi Y_F : 0.91

K_{f1} : 1.00 K_{f2} : 1.00

Fatores da Coroa - resistência

S_{at} : 31970 psi Y_F : 0.91

K_{f1} : 1.00 K_{f2} : 1.00

Tensão de flexão e fator de segurança

S_F : 2515.8 psi S_P : 11.59

S_{factor} : 29160 psi

Tensão de flexão e fator de segurança

S_F : 2110.9 psi S_P : 13.81

S_{factor} : 29160 psi

Figura 9 – Análise da tensão de flexão do estudo de caso 12.12 (Próprio autor, 2023)

Engrenagens

Estudo:

Geométrico

Cinemática/Dinâmica

Tensões

Flexão

Contato

Insira os Parâmetros:

Tensão:

Coefficiente elástico - C_p

E_1 : 3e+7 psi E_2 : 3e+7 psi

ν_1 : 0.30 ν_2 : 0.30

Calcular

Resistência:

Parâmetros de Entrada:

☒ N ☐ L_h ☐ S_H

Número de ciclos - N

N : 4.7e9

Fator de confiabilidade - K_R

Confiabilidade: 99%

Análise de Tensões - Contato

Fatores do Pinhão - contato

C_{p1} : 2291 K_{f1} : 2.00

K_{s1} : 1.25 K_{s2} : 1.00

K_{b1} : 1.34 C_F : 1.00

I : 0.100

Fatores da Coroa - contato

C_{p1} : 2291 K_{f1} : 2.00

K_{s1} : 1.25 K_{s2} : 1.00

K_{b1} : 1.33 C_F : 1.00

I : 0.100

Fatores do Pinhão - resistência

S_{at} : 108956 psi Z_H : 0.87

C_{p1} : 1.00 K_{f1} : 1.00

K_{b1} : 1.00

Fatores da Coroa - resistência

S_{at} : 108956 psi Z_H : 0.87

C_{p1} : 1.00 K_{f1} : 1.00

K_{b1} : 1.00

Tensão de contato e fator de segurança

S_F : 46250 psi S_P : 4.18

S_{factor} : 94580 psi

Tensão de contato e fator de segurança

S_F : 46077 psi S_P : 4.21

S_{factor} : 94580 psi

Figura 10 – Análise da tensão de contato do estudo de caso 12.12 (Próprio autor, 2023)

Tabela 4 – Comparação da análise de tensões do estudo de caso 12.12 (Próprio autor, 2023)

Parâmetros	Shigley		Site		Unidade
	Pinhão	Coroa	Pinhão	Coroa	
fator de sobrecarga (K_o)	2,00		2,00		
fator dinâmico (K_v)	0,801		1,25		
fator de tamanho (K_s)	1,00		1,00		
fator de distribuição de carga (K_m)	1,61		1,34		
fator de espessura de borda (K_B)	1,00		1,00		
coeficiente elástico (C_P)	2276		2291		$in^{0.5}$
fator de condição de superfície (C_f)	1,00		1,00		
fator geométrico de flexão (J)	0,34	0,40	0,32	0,38	
fator geométrico de contato (I)	0,10		0,10		
fator de temperatura (K_T)	1,00		1,00		
fator de confiabilidade (K_R)	1,00		1,00		
fator de ciclo de flexão (Y_N)	0,9121		0,91		
fator de ciclo de contato (Z_N)	0,8681		0,87		
fator de razão de dureza (C_H)	1,00		1,00		
tensão de flexão (s_f)	2881	2449	2515,6	2110,9	psi
tensão de contato (s_c)	50393		46250	46077	psi
fator AGMA de segurança à flexão (S_F)	10,1	11,9	11,59	13,81	
fator AGMA de segurança ao contato (S_H)	3,4		4,18	4,21	

4. CONCLUSÕES

Atualmente, projetos de ECDR's estão presentes no cotidiano de vários engenheiros, seja na vida acadêmica ou no chão de fábrica e desenvolver ou aprimorá-los é uma atividade comum para muitos. Devido à sua complexidade, os engenheiros, muitas vezes, devem manipular equações, extrair dados de tabelas e gráficos, realizar interpolações lineares ou gráficas, tornando-se uma atividade custosa em termo de tempo e esforço. Logo, a utilização de sistemas computacionais para o projeto de engrenagens se mostra uma ferramenta poderosa, o website desenvolvido é uma alternativa competitiva aos produtos que estão no mercado, uma vez que ele é uma fonte gratuita, segura e confiável de conhecimento, onde o usuário terá a liberdade de criar seus projetos, podendo escolher as características do seu modelo.

Por fim, conclui-se que a partir dos resultados obtidos na Tab. 1 à Tab. 4, os objetivos iniciais foram alcançados com a elaboração do website, no entanto, deve-se atentar para os métodos de cálculos dos fatores modificadores de tensão.

5. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em especial, aos professores José Carlos De Lima Junior e João Bosco de Aquino Silva, pela contribuição no desenvolvimento desse trabalho, bem como aos demais envolvidos de forma direta e indireta.

6. REFERÊNCIAS

- AGMA, 1989. *AGMA 908-B89: Geometry Factors for Determining the Pitting Resistance and Bending Strength of Spur, Helical and Herringbone Gear Teeth*. Alexandria: AGMA.
- AGMA, 2004. *ANSI/AGMA 2001-D04: Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth*. Alexandria: AGMA.
- AGMA, 2004. *ANSI/AGMA 2101-D04: Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth*. Alexandria: AGMA.
- BUDYNAS, Richard; NISBETT, J K. *Elementos de Máquinas de Shigley*. São Paulo: Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788580555554. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555554/>. Acesso em: 08 nov. 2022.
- COLLINS, Jack A. *Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas*, 2ª edição. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. E-book. ISBN 9788521636243. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636243/>. Acesso em: 09 nov. 2022.
- FILHO, Marco; Flávio Avilés, A. E. L, 1999, *Sistemas Especialistas – Dimensionamento De Engrenagens Cilíndricas De Dentes Retos*, - Anais do XV COBEM, Águas de Lindóia, SP, Brasil.
- FILHO, Marco S. *Engrenagens - Geometria e Projeto*, 2ª edição. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. E-book. ISBN 9788521634508. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634508/>. Acesso em: 08 nov. 2022.
- FLANAGAN, David. *JavaScript: o guia definitivo*. Porto Alegre: Grupo A, 2013. E-book. ISBN 9788565837484. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788565837484/>. Acesso em: 09 nov. 2022.

- JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. *Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas*, 5ª edição. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. E-book. ISBN 9788521630715. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521630715/>. Acesso em: 09 nov. 2022.
- MAZZO, Norberto. *Engrenagens cilíndricas da concepção à fabricação*. São Paulo: Editora Blucher, 2013. E-book. ISBN 9788521207276. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521207276/>. Acesso em: 09 nov. 2022.
- NORTON, Robert L. *Projeto de Máquinas*. Porto Alegre: Grupo A, 2013. E-book. ISBN 9788582600238. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582600238/>. Acesso em: 08 nov. 2022.
- NORTON, Robert L. *Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos*. São Paulo: Grupo A, 2010. E-book. ISBN 9788580550122. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580550122/>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- RODRIGUES, Romante Ezer F. *Engenharia de desenvolvimento de produtos*. São Paulo: Editora Saraiva, 2021. E-book. ISBN 9786589881544. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786589881544/>. Acesso em: 07 mar. 2023.
- SILVA, Irley; Paiva, Cláudio, 2013, *Ciberativismo e democracia nas redes sociais*. Um espaço de reivindicações e direitos, - Anais do XV Congresso de Ciências da Comunicação, Mossoró, RN, Brasil.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

DEVELOPMENT OF A WEBSITE FOR THE SIZING OF SPUR GEARS

Lúcio Flávio Souza Oliveira

Vinícius Antônio Cardoso Mendes

UFPB – Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, João Pessoa – PB

luciooliveira_@hotmail.com

vinicius.acmendes@outlook.com

José Carlos De Lima Junior

João Bosco de Aquino Silva

UFPB – Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, João Pessoa – PB

limajrcarlos@hotmail.com

joao.bosco@academico.ufpb.br

UFPB, Campus I - Lot. Cidade Universitária, João Pessoa – PB

Abstract. Gears are rotational motion transmission mechanisms consisting of toothed wheels of different sizes that fit together. They are used not only to transfer movement between axes, but also to change the speed and direction of movement and vary the ratio of input speed to output speed. They can be used in many devices such as gearboxes, automobiles, agricultural machines, industrial machines and even watches. The dimensioning of these elements is a complex and sometimes slow process, as several factors must be taken into account, such as: estimating the load applied to the tooth; define the module to be used, calculate the contact and bending stresses; determine safety factors; in addition to defining the material used and the heat treatments used. In this sense, due to the great demand allied to the complexity of gear designs, this article had as its general objective the development of a website for the design of a pair of cylindrical gears with straight teeth - ECDR, aiming not only to facilitate the routine of students and professionals in the field, in order to optimize your time and direct it to more important tasks, but also to minimize errors that can be caused in ECDR calculations. The development of this work was divided into the following methodological procedures: (a) bibliographic survey on artistic design; (b) website prototype coding; (c) testing and validation of prototypes. The results showed that the site was developed effectively, with an intuitive design, so that it was able to meet the needs of the users, providing them with accurate and reliable results for the dimensioning of straight cylindrical gears. Thus, based on the results presented, it can be stated that the developed site is a useful and simplified tool for the design of these mechanical elements.

Keywords: ECDR; Website; Sizing.

RESPONSIBILITY NOTICE

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