



KLS

Projeto de Máquinas

09920	0.285536	0.285536	0.388262	Yg	35.7990	YesYo-r*mat	cos(alfa)
00325	0.000000	0.000000	0.000000	Zg	08.74200	ZesZes*mat	sin(alfa)
				Eg	52.62622	RSeI*Posi	shatun_sborka
				Fg	49.49	(Yg-Ye)*	(Yg-Ye)
				Yg	49.49	cos(alfa)	(Yg-Ye)/(Zg-Ze)
				Yg	57.133	sin(alfa)	(EF*EF + E
				Zg	60.634	RSeI*Posi	shatun_sborka
				ps5	0.09435	Yg-Ye	EF*mat
						Zg-Ze	EF*mat

Projeto de Máquinas

Yane Ribeiro de Oliveira Lobo
Ismael Emílio de Oliveira Júnior
Eduardo Costa Estambasse
Ana Carolina Gigli Shiguemoto

© 2019 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Danielly Nunes Andrade Noé

Grasiele Aparecida Lourenço

Isabel Cristina Chagas Barbin

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

José Renato Carpi

Pedro Donizeti Bolanho

Wilson Moisés Paim

Editorial

Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)

Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Lobo, Yane Ribeiro de Oliveira

L799p Projeto de máquinas / Yane Ribeiro de Oliveira Lobo et al. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

224 p.

ISBN 978-85-522-1466-3

1. Sistemas de transmissão de potência. 2. Mecanismos.
3. Dimensionamento de componentes. I. Lobo, Yane Ribeiro de Oliveira. II. Título.

CDD 620

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2019

Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza

CEP: 86041-100 — Londrina — PR

e-mail: editora.educacional@kroton.com.br

Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1

Fundamentos gerais sobre o projeto de máquinas	7
Seção 1.1	
Introdução ao projeto de máquinas: conceitos e definições	9
Seção 1.2	
Avaliação de aspectos técnicos e econômicos	26
Seção 1.3	
Métodos, custos, ferramental, seleção de materiais, cronograma	42

Unidade 2

Análise e modelagem básica de uma máquina.....	61
Seção 2.1	
Análise de falhas e cálculo de esforços	63
Seção 2.2	
Análise dimensional e estrutural	82
Seção 2.3	
Prototipagem.....	97

Unidade 3

Dimensionamento do sistema de transmissão de potência	119
Seção 3.1	
Dimensionamento do sistema de transmissão de potência	121
Seção 3.2	
Elementos de ligação.....	133
Seção 3.3	
Projeto de elementos de transmissão.....	148

Unidade 4

Dimensionamento do sistema básico de potência	165
Seção 4.1	
Mancais, freios e cilindros pressurizados	167
Seção 4.2	
Elementos de potência.....	182
Seção 4.3	
Elementos auxiliares de potência	201

$Y_e = Y_0 - r \cdot \text{math.cos}(\alpha)$
 $Z_e = Z_0 - r \cdot \text{math.sin}(\alpha)$
RSetPosition("shatun_

CG=math.sqrt(Yg-Ye

tau=math.atan(Yg-Ye
beta=math.acos(EP*E
ksi=tau-beta

YI 76,093319 RSetRotate("shatun_5
ZI 104,72575

YI=Ye-EP*math.cos(ksi

Palavras do autor

Caro aluno,

Seja bem-vindo à disciplina de Projeto de Máquinas. Aqui você poderá pôr em prática tudo o que aprendeu durante o curso de Engenharia Mecânica e poderá perceber como os assuntos se conectam, por exemplo, você verá como se integram os conteúdos sobre a resistência dos materiais e os elementos de máquinas. Você aprenderá a fazer desde o planejamento até o cálculo dos esforços, passando pela escolha do material, pelo projeto de componentes diversos das máquinas e por sua integração, observando os aspectos de segurança e confiabilidade.

Aprendendo bem esses assuntos, você estará apto a enfrentar o mundo do projeto de máquinas, que é uma vasta área da Engenharia Mecânica. Assim, com os conteúdos que serão apresentados, você aprenderá sobre os conceitos fundamentais dos elementos de uma máquina, aplicando uma sequência lógica para o projeto de máquinas, será capaz de efetuar os principais cálculos necessários ao projeto de uma máquina e saberá dimensionar o sistema de transmissão de potência. Com todo esse conhecimento adquirido, será proposto que você aplique os conceitos estudados na análise cinemática e dinâmica de uma transmissão.

A Unidade 1 aborda os princípios de projeto, a definição das etapas a serem cumpridas, a criação de cronogramas e o cálculo de custos. Além disso, ela fala de coeficientes de segurança, usados quando há incertezas no projeto. Também vai lhe mostrar como escolher um material – ferrosos ou não ferrosos – para uma peça, detalhando os ensaios que devem ser feitos para que se conheça suas propriedades. Nessa unidade, você deverá conhecer e compreender os conceitos fundamentais dos elementos de uma máquina, aplicando uma sequência lógica para o projeto desta máquina.

Na Unidade 2, você verá o cálculo dos esforços atuantes no seu projeto, tanto os estáticos como os dinâmicos. Também aprenderá a analisar as possíveis falhas que podem ocorrer: as falhas estáticas, as dinâmicas e as causadas por fadiga. Verá o dimensionamento de alguns tipos de componentes e atuadores e aprenderá sobre protótipos. Nessa unidade, você deverá

conhecer, compreender e ser capaz de efetuar os principais cálculos necessários ao projeto de uma máquina.

A Unidade 3 lhe mostrará o dimensionamento do sistema de transmissão de potência, incluindo os motores e transmissões por atrito. Você também aprenderá o uso e dimensionamento de alguns elementos de máquinas, como acoplamentos, eixos, molas, chavetas, correias e correntes. Nessa unidade você deverá conhecer, compreender e ser capaz de dimensionar um sistema de transmissão de potência.

Na Unidade 4, você verá alguns outros elementos, como mancais de deslizamento e de rolamentos, freios, cilindros pressurizados, trens de engrenagens, incluindo variadores de velocidade, parafusos de potência e embreagens, além de manivelas, volantes e rotores de alta velocidade. Nessa última unidade, você aprenderá a aplicar os conceitos estudados para a análise cinemática e dinâmica de uma transmissão.

Durante o desenvolvimento de cada unidade, você será desafiado por situações-problema e exercícios para que você pratique e possa assimilar cada conteúdo. Mas tudo isso depende de um outro fator: você! Isso mesmo. Você deve se dedicar e estudar. Só assim você terá os conhecimentos necessários para ser um grande engenheiro e estar preparado para o mercado de trabalho.

Bons estudos!

Unidade 1

Fundamentos gerais sobre o projeto de máquinas

Convite ao estudo

Caro aluno,

Um engenheiro mecânico, por sua versatilidade de conhecimentos, pode trabalhar em diversas áreas e uma delas é o projeto, particularmente, o projeto de máquinas e equipamentos. Caso você venha a atuar nessa área, precisará estar preparado para cumprir a contento sua missão e procurar adquirir as competências e habilidades que são voltadas para o cumprimento dessas atividades. Nesta primeira parte dos estudos, a competência a ser desenvolvida está voltada para conhecer e compreender os conceitos fundamentais dos elementos de uma máquina, aplicando uma sequência lógica para o projeto de máquinas.

Projetar máquinas não é uma tarefa fácil, mas pode ser bem feita, desde que você siga algumas regras e seja atento aos detalhes. Todo projeto deve seguir uma sequência de tarefas, porque uma tarefa muitas vezes depende dos resultados das anteriores.

Vamos imaginar que você foi contratado por uma empresa que constrói máquinas e equipamentos diversos, principalmente sob encomenda. Seus produtos variam desde pequenos carrinhos para transporte de equipamentos até grandes caixas de transmissão, usadas em caminhões e tratores, e os processos realizados são principalmente de usinagem e conformação. Novos projetos de máquinas chegam com frequência para a empresa. O seu primeiro desafio nesta empresa é gerenciar o projeto de um dispositivo para levantamento manual de cargas (também conhecido como “girafa”). Quais tarefas estão envolvidas para a conclusão desse projeto? Você sabe qual a sequência das tarefas a serem realizadas? Como preparar um cronograma do projeto de máquina para ser apresentado ao cliente? Quais os principais cálculos de custos envolvidos?

Para responder a essas e muitas outras perguntas você verá os principais conceitos necessários para iniciar um projeto de uma máquina. Aprenderá quais etapas devem ser consideradas em um projeto de máquinas, como preparar um cronograma e como definir a confiabilidade, que será calculada sob o foco de fatores de segurança. Aprenderá, também, que ao projetar uma peça, um item de extrema importância é saber selecionar o material a

ser utilizado. Uma peça pode ser feita de aço, alumínio, cerâmica, teflon ou mesmo madeira. Qual material escolher? Existem vários processos de fabricação que podem ser utilizados para a produção de uma mesma peça. Mas, qual desses processos são mais eficientes e eficazes?

Com todo esse aprendizado, você terá condições de definir e analisar as características que permeiam o projeto de uma máquina. Bons estudos!

Introdução ao projeto de máquinas: conceitos e definições

Diálogo aberto

Caro aluno,

Vamos dar início aos nossos estudos. Em nossa disciplina, vamos trabalhar com o projeto de máquinas, um tema bastante complexo, pois envolve muitos aspectos, tais como cálculos estruturais, dinâmica, estática, propriedades dos materiais, cálculos de esforços e muito mais. Um projeto não pode ser feito sem um bom planejamento, afinal, sem planejar suas ações, você pode ser obrigado a voltar atrás muitas vezes por causa de erros cometidos.

Pensando nisso, esta primeira seção foi preparada para você aprender sobre as etapas que devem ser cumpridas para que o projeto de máquinas seja bem executado. São dez etapas que vão da ideia inicial até a produção do equipamento. Vale destacar que essas fases não têm um caminho único e fácil para a solução final. Ao contrário, cada fase depende de informações, que nem sempre estão disponíveis, e, por isso, está sujeita a erros e incertezas, de forma que muitas vezes você terá que voltar um passo para recomeçar. Essa iteração é fundamental para que você aprenda com seus erros e se aperfeiçoe. Não esqueça que realizar uma antecipação dos erros possíveis, seja de operação ou do próprio projeto de uma máquina, é essencial para capacitar o sistema a absorver as falhas sem gerar consequências graves. O início de um projeto de máquina é a identificação da necessidade daquela máquina.

Também veremos nesta primeira seção a construção de um cronograma para o projeto. Se você compreendeu a importância da iteração, deve estar achando que fazer um cronograma confiável é quase impossível, certo? Não é bem assim. A confiabilidade desse cronograma vai depender de seus conhecimentos sobre os assuntos que serão abordados no decorrer do projeto, e, é claro, as iterações podem alterar os cronogramas. Apesar disso, veremos que existem datas que devem ser respeitadas, sob pena de inviabilizar o projeto. Afinal, se queremos lançar um produto no mercado e nossos concorrentes lançam produtos similares antes de nós, provavelmente nosso lançamento será prejudicado.

Lembre-se que você foi contratado por uma empresa que fabrica máquinas e equipamentos diversos, principalmente sob encomenda. O seu primeiro desafio nessa empresa é gerenciar o projeto de um dispositivo simples de levantamento de carga (uma *girafa*, conforme mostra a Figura 1.1). Esse tipo

Figura 1.1 | Equipamento de levantamento de carga “girafa”



Fonte: adaptado de Montovani et al (2013).

de dispositivo é muito comum em oficinas por ser eficiente e barato. Essa girafa possui duas pernas horizontais de apoio, em formato de “V”, com três pontos de apoio, devendo suportar uma carga de 400 kg.

Para realizar esse projeto, você ficou encarregado de planejar suas fases e apresentar o cronograma correspondente. Quais tarefas estão envolvidas para a conclusão desse projeto de máquina? Como organizá-las e sequenciá-las?

Esse é um primeiro passo para seu desenvolvimento em projeto de máquinas. Assim, estude, aproveite e se dedique ao máximo para estar habilitado as próximas etapas.

Não pode faltar

Prezado aluno.

O conceito de projeto de máquinas, apresentado por Norton (2013), trata da criação de uma máquina que funcione bem, com segurança e confiabilidade. Outro aspecto apresentado por Norton (2013, p. 4) a respeito do projeto de máquinas é que:

“Na definição, as peças inter-relacionadas também são chamadas, às vezes, de elementos da máquina neste contexto. A noção de trabalho útil é básica para a função de uma máquina, existindo quase sempre alguma transferência de energia envolvida. A menção a forças e movimento também é crucial ao nosso interesse, uma vez que, ao converter uma forma de energia em outra, as máquinas criam movimento e desenvolvem forças. É tarefa do engenheiro definir e calcular esses movimentos, forças e mudanças de energia de modo a determinar as dimensões, as formas e os materiais necessários para cada uma das peças que integram a máquina. Esta é a essência do projeto de máquinas.

É importante entender que o objetivo final de um projeto de máquinas é determinar as dimensões e ser capaz de dar a forma adequada às peças que comporão o conjunto, assim como selecionar os materiais e os processos de fabricação que devem ser utilizados, sempre observando que a função esperada seja executada sem falhas. Assim o engenheiro deve saber executar cálculos e antever o modo e as premissas de falha de cada elemento, assim como definir o projeto de forma a precaver a falha, por meio de uma análise de tensão e deflexão para cada elemento da máquina.

A nossa sociedade trabalha sobretudo com máquinas. São vários tipos, tamanhos e formatos, com inúmeros usos. Elas vão desde cortadores de unha até aviões, e a cada dia surgem novos tipos e modelos. Mas essas máquinas não surgem por acaso, elas dependem de alguém que desenvolva um projeto e depois as construa. E quem desenvolve um projeto desses? Normalmente é um engenheiro mecânico. E esse projeto, como é feito?



Refleta

Você acha que é realmente necessário definir as etapas de um projeto ou podemos poupar tempo simplesmente usando os conceitos de engenharia na ordem que nos parecer melhor?

Todo projeto surge de uma necessidade, ou seja, alguém precisou de algo e conseguiu esclarecer o que era. Depois disso, começa o desenvolvimento do projeto. Alterações em um projeto dependem da fase atual: quanto mais tarde tentarmos mudar o projeto, mais cara essa mudança será. Eventualmente, a mudança pode ficar tão cara que pode inviabilizar o projeto a partir daquele momento.



Pesquise mais

Para saber sobre custos de alterações em projetos veja:

BAXTER, M. **Projeto de Produto**. p. 23. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 2003.

O projeto de máquinas deve apresentar algumas fases até sua conclusão. A primeira delas é a preliminar, que é voltada para realização da síntese, avaliação e comparação das máquinas recomendadas ou dos conceitos de sistemas. Nessa fase são avaliadas as características de desempenho mais admissíveis, apoiadas na experiência dos membros da equipe de projeto, e criados os componentes ou elementos da máquina ou sistema, seguidos por uma averiguação do comportamento total do sistema. O resultado dessa fase de projeto é a concepção de um conceito a ser projetado com profundidade para atender a todas

as especificações definidas, bem como ao desempenho, à segurança, à vida, ao custo, entre outros.

Em seguida ocorre o projeto intermediário, que envolve o estudo em profundidade do projeto de engenharia dos componentes na forma individual e dos subsistemas que comporão a máquina ou sistema previamente selecionado. Nessa fase do projeto, deve-se estabelecer propostas que proporcionem às peças e subsistemas um funcionamento tão bom ou ainda melhor do que o proposto no projeto preliminar. Elas devem estar voltadas para a definição do material, da geometria e da montagem dos componentes, além dos fatores relacionados à segurança, montagem, fabricação, manutenção, inspeção e custo. Assim, o resultado dessa fase é a definição das principais especificações referentes à performance, segurança, manutenção, fabricação e inspeção.

A fase de detalhamento é direcionada, entre outras atividades, para composição e estruturação, disposição dos componentes, forma, definição de ajuste dimensional entre as peças, ajustes e tolerâncias, padronizações, definição dos processos de fabricação e montagem, segurança, definição e listagem de material e das peças a serem compradas e/ou produzidas. Resulta dessa fase um conjunto composto por todos os desenhos e especificações da máquina.

O projeto de máquinas é trabalhado em muitas oportunidades, por meio de uma metodologia de projetos que auxilia na organização e estruturação da resolução do problema a ser tratado. É importante na utilização dessas metodologias que, ao finalizar uma etapa e antes de passar para a próxima, seja checado e se tenha certeza que todas as tarefas foram concluídas com sucesso.

Vamos ver, então, as dez etapas de um projeto segundo a metodologia de projeto apresentada por Norton (2013).

Etapa 1: identificação da necessidade.

Aqui surge uma necessidade, que pode ser pessoal, de um grupo ou empresa, ou simplesmente a identificação de um nicho de mercado que surgiu. Geralmente, essa etapa começa com uma ideia mal explicada, sem grandes justificativas, mas quem a teve acredita que vai render um grande projeto. É claro que nem todas as ideias rendem bons projetos, e é muito importante que saibamos distinguir as boas ideias das que não são tão boas! Isso pode ser feito por meio de pesquisas de mercado. Não adianta você ter uma ideia fantástica para um produto e descobrir depois que ninguém está interessado nele.



Pesquise mais

Pesquisas de mercado são essenciais para o sucesso de qualquer empreendimento. Para que você se informe mais sobre o assunto, consulte a referência a seguir, principalmente as páginas 23 a 30, em que se fala sobre os objetivos de uma pesquisa.

DIAS, S. R. **Pesquisa de Mercado**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2007. [Minha Biblioteca].

Etapa 2: busca de informações.

Nessa fase, com base na ideia já definida, devem ser buscadas informações sobre o dispositivo a ser projetado. Se o dispositivo já existir, não será difícil, basta pegar especificações com os manuais ou na internet. Fotos, vídeos, documentos, tudo isso pode ajudar a compreender a máquina que precisamos projetar. Se dispusermos de uma, será ainda mais fácil. Podemos analisá-la completamente, inclusive desmontando-a, se necessário. Algumas pessoas chamam esse processo de engenharia reversa, que é quando você desmonta uma máquina existente e tenta descobrir como ela foi projetada e fabricada.

Caso o dispositivo que você quer projetar ainda não exista, fica mais complicado. Você deve procurar máquinas parecidas, que funcionem pelo mesmo princípio para entendê-las. Neste caso, provavelmente serão várias, cada uma com alguma característica interessante. Você deve obter o máximo de informações de cada uma.

Somente com muitas informações você será capaz de atingir a próxima etapa.

Etapa 3: definição dos objetivos.

Uma vez que você tenha informações suficientes sobre o equipamento a projetar, agora você deve definir claramente o que deseja projetar.



Exemplificando

Se você deve projetar um dispositivo para abertura e fechamento de portão (muito usado em condomínios), provavelmente uma das definições nesse ponto seria sobre a forma como o dispositivo funcionará: se com pinhão e cremalheira (para portão deslizante) ou por rotação do portão. Os objetivos do dispositivo, então, podem ser: abrir ou fechar o portão em 5 segundos; poder parar no meio do trajeto; poder reverter o movimento imediatamente.

Dentre os objetivos, sempre é possível (e desejável) incluir um relativo aos custos (ou gastos). Para definir esses objetivos, é preciso focar na ideia inicial e nas limitações existentes, como de gastos.

Etapa 4: especificação das tarefas.

De posse dos objetivos de seu projeto, para desenvolvê-lo, precisamos definir o que precisa ser feito. Assim, cada tarefa deve ser definida com o máximo possível de detalhes, de forma que o desenvolvedor dessa tarefa saiba o que deve fazer. Comece imaginando o produto final pronto e vá dividindo-o em suas partes (ou peças).

Por exemplo, digamos que, para o dispositivo citado na etapa 3, o tipo seja para portão deslizante. Algumas das tarefas seriam: dimensionar o pinhão; dimensionar a cremalheira; selecionar o motor mais adequado; definir a fixação do motor; definir a caixa para conter o pinhão. Veja que essas são só algumas das tarefas. O conjunto todo seria muito maior, e isso para um equipamento relativamente simples. Imagine como seria para um automóvel!



Assimile

Nessa fase são definidas as tarefas, mas elas não são executadas, pois ainda não foi definido o conceito final de nosso dispositivo.

Etapa 5: síntese.

A etapa de síntese é o momento de buscar as alternativas de projeto. Em outras palavras, tenta-se obter tantas concepções quanto possível para nosso projeto. Não se deve colocar barreiras para a imaginação nessa fase, qualquer ideia deve ser considerada. Assim, qualidade ou custo não devem ser barreiras. Isso é importante porque mesmo uma alternativa exótica pode trazer detalhes que interessem na concepção final. As técnicas para se encontrar as alternativas formam o processo criativo e passam por discussões livres (*brainstorming*), discussões dirigidas (*brainwriting*) e outras técnicas.



Pesquise mais

Para saber mais sobre essas técnicas para encontrar as melhores alternativas de projeto consulte o capítulo quatro do livro a seguir:
BAXTER, M. **Projeto de Produto**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 2003.

Etapa 6: análise.

Depois de encontradas diversas opções de projeto, nessa fase vamos analisar cada uma delas e eliminar as que não atendem a nossos requisitos mínimos. Também vamos aceitar aquelas que têm bom potencial de serem selecionadas e modificar aquelas que podem ter bom potencial depois de alteradas. Assim,

teremos algumas opções viáveis de projeto, sob um ponto de vista mais genérico. E, como fazer para eliminar uma opção? Bem, comece investigando se as tecnologias envolvidas são conhecidas por sua equipe. Depois, verifique os materiais empregados: materiais muito raros ou caros não devem ser utilizados. Verifique também se você dispõe de todos os processos de fabricação necessários, pois eles devem estar disponíveis em sua própria empresa ou em fornecedores cadastrados.

É importante que todas as alternativas (selecionadas ou eliminadas) sejam registradas com todos os seus detalhes, porque, em um momento posterior, pode ser necessário alterar algo no projeto e talvez você descubra que havia uma ideia interessante em uma das opções descartadas que poderia resolver seu problema.

Etapa 7: seleção.

Ao final da etapa anterior, algumas opções de projeto podem ser adotadas. Como selecionar a melhor de todas? Você pode começar usando critérios parecidos com os que usou na etapa 6, mas com um foco um pouco diferente: como você já conhece as tecnologias envolvidas no projeto, pode verificar quais você e sua equipe dominam mais. Quanto aos materiais, veja aqueles que são de mais fácil obtenção e mais fáceis de trabalhar. Quanto aos processos de fabricação, selecione os que sua equipe domina melhor, que têm a melhor qualidade ou que sejam mais baratos. De qualquer maneira, o critério final deve passar pela escolha do projeto que tenha a melhor relação custo/benefício.

Uma forma de fazer a seleção da forma menos subjetiva possível seria construir uma matriz de decisão. Nessa matriz, você deve listar, na primeira coluna, todos os fatores que interessam no projeto (custo de fabricação, adequação dos materiais, conhecimento dos processos de fabricação, custo de manutenção e outros). Na segunda coluna, você deve colocar um peso para cada um desses fatores. Isso vai indicar a importância relativa de cada um dos fatores. As próximas colunas devem listar cada um dos projetos existentes. Agora, para cada projeto, deve ser atribuída uma nota para cada fator. Depois, basta fazer uma média ponderada das notas de cada fator com os pesos e o projeto que tiver a maior média será o escolhido!

Veja na Tabela 1.1 um exemplo desta matriz.

Tabela 1.1 | Exemplo de matriz de decisão

Fator	Peso	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3	Projeto 4
Custo de fabricação	5	3	3	5	2
Adequação dos materiais	3	2	5	2	4
Conhecimento dos processos de fabricação	2	5	3	1	3
Custo de manutenção	4	3	4	3	2
Média ponderada	14	3,07	3,71	3,21	2,57

Fonte: elaborada pelo autor.

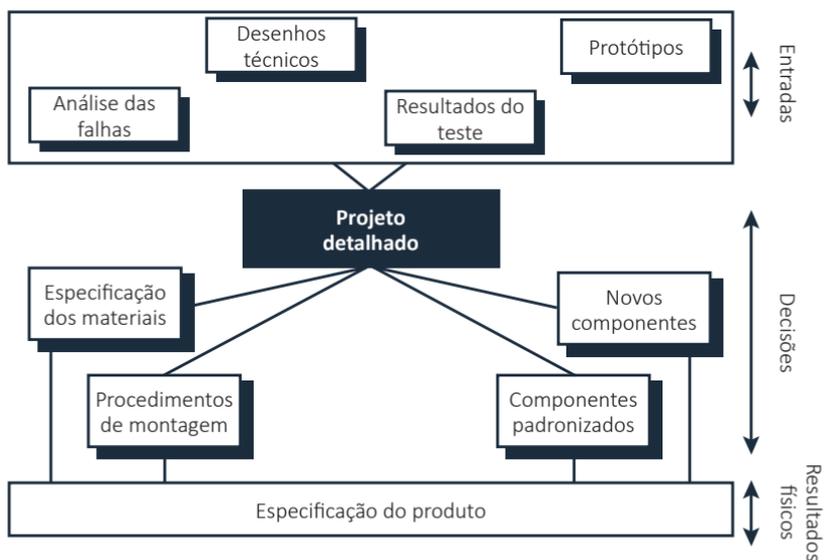
Considerando a tabela acima, o projeto selecionado seria o Projeto 2, que obteve a média 3,71, a maior de todas. Uma coisa deve ficar bem clara é que, para definir os fatores e os pesos, é preciso ter uma equipe multidisciplinar que deve decidir em conjunto. As notas, preferencialmente, devem ser atribuídas por outras pessoas (que não participaram da confecção da matriz acima). Vale salientar que esse método da matriz de decisão também pode ser usado na etapa anterior de análise.

Etapa 8: detalhamento do projeto.

Depois de selecionada a melhor opção, o próximo passo é detalhar o projeto para a produção. Aqui serão desenvolvidos todos os desenhos de todas as peças a serem produzidas. Esses desenhos podem ser das vistas das peças ou mesmo desenhos tridimensionais. Além disso, todos os materiais serão especificados, todos os processos de fabricação (e seu encadeamento) serão definidos e todos os fornecedores identificados também. Note que também devem ser desenvolvidos todos os cálculos de engenharia, envolvendo resistência de materiais, transferência de calor, passagem de correntes elétricas e qualquer outra área que seja necessária.

Nessa fase também deve ser feita uma análise das falhas possíveis, para que o projeto as leve em conta. Em outras palavras, a determinação das falhas potenciais possibilitará “reforçar” o projeto nos seus pontos mais frágeis. Essa etapa pode ser visualizada na figura 1.2, a seguir.

Figura 1.2 | Projeto detalhado



Fonte: Baxter (2003, p. 232).

Etapa 9: prototipagem

Depois de pronto o projeto, nossa maior vontade é começar a produzir o equipamento e vê-lo funcionando, mas isso é muito perigoso, pois falhas no projeto podem levar a problemas sérios, principalmente quando os consumidores finais são envolvidos. Então, a melhor forma de testá-lo é construir protótipos. Entretanto, protótipos nem sempre são uma boa solução, por serem caros (às vezes muito) e consumirem tempo e pessoal. Caso se deseje produzir poucas unidades do equipamento, provavelmente um protótipo não se justificará.

Segundo Baxter (2003), protótipos somente devem ser criados se forem realmente necessários. Em vez de um protótipo, pode-se optar por uma maquete eletrônica, feita em um programa de computador (CAD). Se essa maquete for submetida a um programa de simulação de efeitos (CAE), então poderão ser obtidos resultados muito bons que podem, talvez, substituir o protótipo físico. Entretanto, caso seja realmente necessário o protótipo, então deve-se ter certeza de quais características do equipamento devem ser avaliadas. Em função disso, pode-se escolher o tipo de protótipo a ser desenvolvido. Em primeiro lugar, é preciso definir o tipo de análise que se deseja fazer: estrutural ou funcional (ou ambas). A Figura 1.3 mostra o que se deve representar em função do tipo de protótipo.

Figura 1.3 | Adequação de protótipos

Representação estrutural	Representações estrutural e funcional	Representação funcional
Modelo de apresentação Forma física e aparência (mas não a função)		Protótipo experimental Funções principais (mas não tamanho e forma)
Modelo de forma Tamanho físico e forma (mas não função nem aparência)		Protótipo de teste Funções específicas (mas não tamanho e forma)
	Protótipo de pré-produção Modelo completo de um produto para fabricação (tamanho, forma e função)	
	Protótipo de produção Materiais e processos iguais aos da produção industrial	

Fonte: Baxter (2003, p. 244).

Note que, conforme a complexidade do protótipo aumenta, também aumenta (e muito) seu custo e o tempo de sua produção.

Etapa 10: produção.

Após os testes dos protótipos e as eventuais correções de projeto, nossa máquina está pronta para a fabricação. A quantidade de equipamentos produzidos vai depender dos objetivos. Caso seja um equipamento único, para uso próprio, ou poucas unidades, então não é necessária uma linha de produção. Caso seja uma produção contínua, então deve-se projetar a linha de produção com todos os seus detalhes. Vale salientar que, em todas as etapas, a documentação das atividades é de extrema importância, para que os próximos projetos possam se basear neste e para que os erros cometidos fiquem registrados, a fim de que não sejam cometidos novamente.

Cronogramas

No caso de um projeto, você acha que um cronograma é útil? Certamente que sim, afinal, é preciso estabelecer a finalização de cada etapa e do projeto como um todo. Um cronograma deve ser montado desde o início do projeto, quando apenas as ideias existem. Mas, como montar um cronograma confiável? Uma boa sugestão é trabalhar com um programa que auxilie nessa tarefa, como o Microsoft Project.



Pesquise mais

A Microsoft tem um portal em que você pode saber sobre o Microsoft Project e, inclusive, postar dúvidas. Disponível em:

MICROSOFT. **Microsoft Project**. [S.l.; s.d.]. Disponível em: <https://products.office.com/pt-br/project/project-and-portfolio-management-software>. Acesso em: 18 out. 2018.

Há também outros programas concorrentes, como o Primavera. Veja um rápido vídeo que demonstra suas características:

ACADEMIA DO PLANEJAMENTO. **Primavera P6 – Dica 01 – O que ele pode fazer por você?** 16 jan. 2017. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=kS8L45fUYnA>. Acesso em: 18 out. 2018.

Inicialmente, defina as atividades a serem desenvolvidas. Comece pelas atividades maiores (mais abrangentes) e depois subdivida-as. Para cada atividade, estime quantas pessoas trabalharão nela e suas formações. Depois estime o número de horas que cada atividade consumirá. Com base nisso, você terá um cronograma simples. Contudo, quanto mais você detalhar as tarefas e as pessoas envolvidas, mais preciso será seu cronograma. Note que as tarefas podem ocorrer simultaneamente, mas em nenhum momento se pode ficar sem tarefas a realizar.

De uma maneira bem resumida, no Project, você deve definir as atividades e sua duração. Deve indicar, também, o encadeamento (ou sequência)

dessas atividades. Depois deve indicar as pessoas que trabalharão nele (as funções, não as pessoas) e sua dedicação. Deve colocar os preços de horas de trabalho e de materiais empregados. Com tudo isso, o Project criará o cronograma do projeto e lhe dará um orçamento inicial!

Uma das funcionalidades do Project é a Linha de Base, que é o mecanismo que torna possível estocar as informações sobre o planejamento de um dado projeto. A Linha de Base é uma importante ferramenta, disponibilizada pelo Microsoft Project e utilizada de forma bastante eficiente pelos gerentes de projetos que possuam domínio sobre ela, para monitorar e acompanhar os seus projetos.

Sem medo de errar

Vamos recordar nossa SP? Você deve gerenciar o projeto de um dispositivo simples de levantamento de carga (uma *girafa*). Essa girafa possui duas pernas horizontais de apoio, em formato de “V”, com três pontos de apoio, e deve suportar uma carga de 400 kg. Vamos ver como seria?

Etapa 1 – Identificação da necessidade – nesse caso, a necessidade veio do cliente, que passou à sua empresa as especificações para efetuar o projeto.

Etapa 2 – Pesquisa de suporte – nessa etapa você deve colher informações sobre as girafas já existentes: tipos, configurações, fotos e dados descritivos (dimensões, capacidade, materiais, etc.). Deve catalogar os dados e separá-los de acordo com o tipo de girafa.

Etapa 3 – Objetivos –de posse das informações básicas sobre as girafas existentes, você deve decidir se fará um projeto revolucionário (completamente novo) ou se seguirá o mercado e fará algo parecido com o que já existe. Nesse caso, suponhamos que você seguirá o mercado, afinal, para inovar seria preciso investir muito em pesquisa e testes. Então, você deve definir o formato básico, as dimensões gerais e a capacidade da girafa. A capacidade já foi definida pelo cliente (400 kg). O formato pode ser o tradicional (conforme a figura original). As dimensões também podem ser estimadas pelas girafas existentes.

Etapa 4 – Especificação das tarefas – como já está definido o tipo de girafa, agora vamos estabelecer o que precisa ser feito:

- Definição precisa das dimensões;
- Cálculos estruturais;
- Definição de materiais possíveis;
- Definição de outros componentes (rodas, parafusos, catraca, etc.);

- Especificação do cabo de aço;
- Outras.

Essas tarefas devem ser distribuídas pelos membros da equipe, de acordo com a área de cada um. Note que as tarefas são definidas e distribuídas, mas não executadas.

Etapa 5 – Síntese – nessa etapa, vamos tentar definir as possibilidades de construção da girafa. Nas várias opções de projeto, definiremos, por exemplo, que: em um deles a lança será em uma barra única, em outro, a lança será composta de duas barras que se unem no final; em um projeto, a girafa terá três rodas, em outro, ela terá quatro rodas. A definição é feita pela equipe reunida, e deve-se promover uma discussão livre, em que cada um exponha suas ideias e sugestões. Tudo deve ser anotado pelo líder do grupo para ser discutido em detalhe na próxima etapa. Isso deverá ser feito para cada detalhe do equipamento, até esgotarmos nossa criatividade para criação de projetos diferentes. Todos eles serão cadastrados e ficarão registrados para consulta.

Etapa 6 – Análise – agora que temos várias possibilidades de projeto, temos que selecionar as melhores opções e eliminar as inviáveis. Uma das coisas a fazer é verificar as opções que sejam caras demais, ou que tenham tecnologias desconhecidas. Depois disso, podemos verificar as afinidades de nossa equipe com as tecnologias envolvidas. Por exemplo, digamos que algumas opções determinem que a soldagem da estrutura inferior na estrutura de suporte seja do tipo MAG, e outras opções definam esta soldagem como sendo tipo oxigás. Sabendo que essa última não oferece boa qualidade, podemos eliminar as que usam este processo de soldagem.

Etapa 7 – Seleção – com as opções inviáveis eliminadas, agora devemos selecionar a melhor das opções restantes. Para isso, podemos usar a matriz de decisão. Os itens de comparação e seus pesos deverão ser definidos por uma equipe que envolva todas as áreas do projeto. Por exemplo, a Tabela 1.2 apresenta uma matriz de decisão que poderia ser utilizada:

Tabela 1.2 | Matriz de decisão para a girafa

Item	Peso
Custo	5
Aparência final	4
Tempo para fabricação	2
Facilidade de operação	4
Rigidez	2
Facilidade para encontrar componentes	1

Fonte: elaborada pelo autor.

Com a matriz pronta, uma outra equipe atribuiria notas, nos projetos, para cada um desses itens. Dadas as notas, seria calculada a média ponderada de cada projeto. Aquele com a maior média seria o escolhido.

Etapa 8 – Detalhamento do projeto – com o projeto selecionado, o próximo passo é fazer o seu detalhamento. É preciso fazer todos os desenhos para produção, relacionar todos os materiais, efetuar todos os cálculos de resistência, definir todos os fornecedores de matéria-prima e componentes. Em resumo, ao final dessa etapa, será possível fabricar a girafa sem que nada falte.

Etapa 9 – Prototipagem – agora deve-se criar os protótipos da girafa. Inicialmente, uma maquete eletrônica deve ser útil para que se possa ver seu funcionamento. A equipe deve julgar se é preciso criar uma maquete física e, nesse caso, como será feita. Considerando que as forças envolvidas são bem conhecidas e os cálculos de resistência não são muito complexos, possivelmente não será necessário criar uma maquete física, mas isso deve ficar a cargo da equipe.

Etapa 10 – Produção – nessa etapa, a girafa será colocada em produção e todos os detalhes devem ser definidos. Arranjo físico das máquinas, armazenamento de matéria-prima e de componentes, máquinas a serem usadas, estocagem das girafas prontas, etc.

Para o cronograma, vamos considerar as tarefas definidas aqui, ou seja, as etapas do projeto. Teríamos, então, um cronograma como o que segue:

Tabela 1.3 | Cronograma de etapas

Tarefa	D1-D2	D2-D3	D3-D4	D4-D5	D5-D6	D6-D7	D7-D8	D8-D9	D9-D10	D10-D11	D11-D12	D12-D13	D13-
Etapa 1													
Etapa 2													
Etapa 3													
Etapa 4													
Etapa 5													
Etapa 6													
Etapa 7													
Etapa 8													

Tarefa	D1- D2	D2- D3	D3- D4	D4- D5	D5- D6	D6- D7	D7- D8	D8- D9	D9- D10	D10- D11	D11- D12	D12- D13	D13-
Etapa 9													
Etapa 10													

Fonte: elaborada pelo autor.

Aqui, D1, D2, etc. representam datas. Devemos ter uma data de início e uma data de fim da tarefa. Note que algumas tarefas podem se sobrepor parcialmente. Seguindo esses passos, conseguimos criar nosso projeto, conforme desejado. Vale lembrar que as diversas etapas podem requerer uma volta para a etapa anterior, devido a problemas que não podem ser resolvidos. Essa decisão vai depender do engenheiro de projeto encarregado da missão.

Avançando na prática

Desenvolvimento de um abridor de garrafas

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma empresa de componentes estampados em chapa, que recebeu uma encomenda para projetar um abridor de garrafas contendo as funcionalidades de abrir garrafas e sacar rolhas. Faça uma definição das etapas e crie um cronograma para este projeto.

Resolução da situação-problema

Quanto à etapa 1, a necessidade já existe e já foi definido o que se deseja. Para a etapa 2, você deve verificar abridores de garrafas já existentes. Tire fotos, veja as características, tome as medidas e determine os materiais de que são feitos, para cada um deles. Agora, na etapa 3, você deve estabelecer seus objetivos, entre os quais, se o abridor também abrirá latas e se ele será também um saca-rolhas.

Na etapa 4 devem ser especificadas todas as tarefas, como os desenhos a ser feitos, os cálculos de resistência, as dimensões básicas, etc. Agora, na etapa 5, deve ser reunido o maior número possível de opções para o abridor. A etapa 6 permite que sejam eliminadas as opções inviáveis. Quanto às demais, deve-se verificar quais delas precisam de ajustes para continuar viáveis.

Definidas as opções viáveis, vamos para a etapa 7, em que é feita a seleção da melhor opção. Deve-se usar uma matriz de decisão, para a qual serão

definidos os itens de comparação e seus pesos. Feito isso, uma outra equipe deverá atribuir as notas para cada item e cada opção. Com isso, torna-se possível fazer a escolha de forma objetiva.

Com a opção de projeto definida, agora você deve detalhar o projeto (etapa 8): fazer os desenhos e os cálculos de resistência, definir a aparência do abridor, realizar uma análise de falhas, etc. A etapa 9 especifica que devem ser construídos protótipos para vários objetivos, entre os quais, verificação de resistência, aceitação visual pelos clientes, etc. Com tudo pronto, na etapa 10, é hora de colocar nosso abridor de garrafas em produção.

Um cronograma simples seria:

Tabela 1.4 | Cronograma de atividades

Tarefa	02-/01-10/01	10/01-14/01	14/01-25/01	25-01-30/01	30/01-20/02	20/02-25/02	25/02-15/03	15/03-22/03	22/03-30/04	30/04-15/05	15/05-15/06	15/06-30/06
Etapa 1												
Etapa 2												
Etapa 3												
Etapa 4												
Etapa 5												
Etapa 6												
Etapa 7												
Etapa 8												
Etapa 9												
Etapa 10												

Fonte: elaborada pelo autor.

Com isso, foi criada uma definição das etapas e um cronograma para este projeto.

Faça valer a pena

1. Todo engenheiro que pretenda projetar algo de forma correta deve seguir alguns passos, de forma a não perder o foco da questão e aproveitar o máximo de recursos e pessoas para o projeto. Esses passos, ou etapas, devem ser seguidos corretamente, ou o engenheiro corre o risco de ter que voltar atrás em todo o processo. Então, considere as asserções a seguir e a relação entre elas.

- I. Para que um projeto seja eficiente é preciso sintetizar tudo o que foi estudado para, em seguida, propor soluções para o problema.

PORQUE

- II. O próximo passo é fazer uma análise das opções disponíveis e eliminar as inviáveis.

Considerando essas afirmações, marque a alternativa correta:

- a) A asserção I é uma proposição falsa, e a II uma proposição verdadeira.
b) Tanto a asserção I quanto a II são proposições falsas.
c) As duas asserções são proposições verdadeiras, e a II é uma justificativa correta da I.
d) As duas asserções são proposições verdadeiras, mas a II não é uma justificativa correta da I.
e) A asserção I é uma proposição verdadeira, e a II uma proposição falsa.

2. Em todo projeto de equipamentos, máquinas ou componentes, várias fases devem ser seguidas, para garantir seu sucesso. É possível que seja necessário retroceder nas fases para corrigir erros, por isso, em todas essas fases a documentação é muito importante.

Sobre essa fase, então, considere as seguintes asserções:

- I. A documentação somente deve ser feita no final do projeto, pois antes disso há possibilidade de modificar a opção escolhida, o que invalidaria a documentação.
II. A documentação deve incluir, além dos descritivos dos componentes, desenhos detalhados.
III. Os desenhos do projeto sempre devem ser tridimensionais, para uma perfeita visualização do projeto como um todo.

Com relação a estas afirmações, assinale a alternativa correta.

- a) Apenas a afirmação II é correta.
b) Apenas a afirmação I é correta.
c) As afirmações I e III são corretas.
d) Apenas a afirmação III é correta.
e) Todas as afirmações são corretas.

3. Um projeto, para ser considerado bem feito, deve ter um cronograma com todas as etapas do desenvolvimento. Cada etapa deve ter bem definido seu início e fim. Com relação aos cronogramas de projetos, considere as afirmações a seguir.

- I. A primeira etapa, de identificação da necessidade, não precisa constar no cronograma, porque a necessidade normalmente já está identificada.
II. Uma vez estabelecido o cronograma ele não pode ser modificado, sob pena de inviabilidade do projeto.

III. O cronograma pode ter etapas com trechos simultâneos, mas não pode ter vazios, ou seja, datas em que nenhuma etapa esteja sendo trabalhada.

Considerando as asserções acima, assinale a alternativa correta:

- a) Apenas a afirmação I é correta.
- b) Todas as afirmações são incorretas.
- c) Apenas a afirmação II é correta.
- d) Todas as afirmações são corretas.
- e) Apenas a afirmação III é correta.

Avaliação de aspectos técnicos e econômicos

Diálogo aberto

Caro aluno, se você observar um carro, notará que sua estrutura é feita de aço, mas por quê aço? Porque é um material resistente, oferece mais segurança aos usuários, é mais barato quando comparado com outros materiais e fácil de ser processado. Carros mais sofisticados (por exemplo, os da Fórmula 1) têm sua estrutura de fibra de carbono, ao invés de aço, porque é cerca de 4 vezes mais leve que o aço e 2 vezes mais resistente. Porém, ela tem um custo 5 a 20 vezes maior que o aço! Como você pode notar, a escolha do material certo para confeccionar uma peça (ou máquina), alinhado com fatores de segurança, confiabilidade e custo, é fundamental para o sucesso do projeto. Assim, é importante que você saiba que, quando se projeta uma máquina, deve-se levar em conta as situações extremas de utilização a que ela estará sujeita. Algumas vezes, entretanto, não é possível saber tudo. Para compensar esse desconhecimento, existe o **coeficiente de segurança** (ou **fator de segurança**) que se aplica aos cálculos para levar em conta o imprevisto. Vamos analisar um caso prático?

Você está coordenando o projeto de uma girafa para levantamento de peso. O projeto anterior apresentou um problema: a lança vergou quando foi levantada uma carga ligeiramente acima do limite, que era de 400 kg e foram carregados 410 kg. Supõe-se que a falha ocorreu devido ao coeficiente de segurança ter sido calculado de forma errada, mas como você pode certificar-se do verdadeiro valor do coeficiente de segurança? Consegue recalculá-lo? Uma outra atividade prevista no cronograma de projeto é a seleção dos materiais a serem empregados na construção deste dispositivo. Assim, quais são os critérios para definição dos materiais a serem utilizados na estrutura? É possível estimar os custos do projeto com as informações existentes? Para ajudá-lo na resolução destas atividades, nesta seção você aprenderá sobre confiabilidade e fator de segurança, verá como calcular os custos de um projeto e aprenderá a selecionar materiais ferrosos, metais não ferrosos e materiais não metálicos, bem como seus processos de fabricação.

Um profissional de engenharia com conhecimentos abrangentes nos vários assuntos relacionados a projeto de máquinas terá um diferencial imenso a seu favor, pois cada atividade técnica e o gerenciamento de projetos têm grande importância estratégica e amplitude corporativa nos dias de hoje. Assim, motive-se e procure aprender ao máximo com afinco!

Bons estudos!

Fator de segurança - confiabilidade

Você já parou para pensar em como são projetadas as máquinas para resistir aos esforços que elas têm que suportar? Pense em um elevador, por exemplo. Como podemos ter certeza de que, mesmo com os trancos que sofre nas paradas e partidas, ele não cairá? Na verdade, muitos cálculos de resistência têm que ser feitos para que sejam dimensionados os cabos de aço que sustentam o elevador e também a estrutura. Mas apenas isso não basta. Mesmo calculando a maior carga que ele sustentará e aplicando nesta carga total a maior aceleração que o motor poderá produzir, ainda não teríamos segurança no projeto. Isso porque podem acontecer trancos diversos, uma pessoa que derrube algo pesado dentro do elevador ou vários outros fatores imprevisíveis. Então, para levar em conta tudo isso, foi criado um fator chamado de coeficiente de segurança. Este coeficiente é definido como a relação entre duas grandezas semelhantes, como tensão admissível do material e tensão máxima a ser suportada. É um fator sempre adimensional e maior que a unidade (há raríssimas exceções em que este coeficiente é a unidade), que deve ser multiplicado pela carga máxima encontrada no projeto. Esta nova carga é que deverá ser usada para dimensionar os cabos de aço e toda a estrutura do elevador. Como este fator é empírico, como saber que valor utilizar? Para cada área já existem estudos feitos e coeficientes de segurança propostos. Por exemplo, Norton (2013) propõe a seguinte tabela para materiais dúcteis:

Tabela 1.5 | Sugestões de fatores de segurança para materiais dúcteis

Informações	Qualidade das informações	Fator
Dados das propriedades dos materiais disponíveis a partir de testes	O material realmente utilizado foi testado	F1
	Dados representativos de testes do material estão disponíveis	1,3
	Dados razoavelmente representativos de testes do material estão disponíveis	2
	Dados insuficientemente representativos de testes do material estão disponíveis	3
Condições ambientais nos quais será utilizado	São idênticas às condições dos testes de materiais	5+
	Essencialmente igual ao ambiente de um laboratório comum	F2
	Ambiente moderadamente desafiador	1,3
	Ambiente extremamente desafiador	2
Modelos analíticos para forças e tensões	Os modelos foram testados em experimentos	3
	Os modelos representam precisamente o sistema	F3
	Os modelos representam aproximadamente o sistema	1,3
	Os modelos são aproximações grosseiras	2
		3
		5+

Fonte: Norton (2013, p. 19).

O fator de segurança N deve ser escolhido por:

$$N_{Dúctil} \cong MÁX(F1, F2, F3)$$

Para materiais frágeis, a incerteza é maior e, assim, a equação acima deve ser reescrita como:

$$N_{Frágil} \cong 2 \cdot MÁX(F1, F2, F3)$$

Para decidir sobre o coeficiente de segurança, um bom início é comparar as condições em que sua peça vai trabalhar e as condições nas quais foram obtidos os dados do material considerado. Se as suas condições são mais severas, então o coeficiente de segurança deve ser ainda maior que o proposto.

Quando se dimensionam cabos de aço, também há sugestões de coeficientes de segurança. Veja a Tabela 1.6 a seguir:

Tabela 1.6 | Coeficientes de segurança para cabos de aço

Aplicação	Fator de segurança
Cabos e cordoalhas estáticas	3 a 4
Cabo para tração horizontal	4 a 5
Guinchos	5
Pás, guindastes, escavadeiras	5
Pontes rolantes	6 a 8
Talhas elétricas e outras	7
Guindastes estacionários	6 a 8
Laços	5 a 6
Elevadores de baixa velocidade (carga)	8 a 10
Elevadores de alta velocidade (passageiros)	10 a 12

Fonte: adaptado de Melconian (2013, p. 268).

Note que para elevadores de passageiros o menor coeficiente de segurança é 10. Para dimensionar correias e polias, bem como correntes e rodas dentadas, também há tabelas com sugestões de fatores de segurança. Então, em função da máquina que você vai dimensionar, procure os coeficientes de segurança sugeridos e use-os.

Uma coisa deve ficar bem clara: um coeficiente de segurança existe para levar em conta as incertezas do projeto. Então, quanto melhor você conhecer o dimensionamento que está fazendo, menor pode ser o fator de segurança e vice-versa. Além disso, quando há vidas em risco, este fator sobe. Quanto maior o prejuízo devido à quebra da máquina, também, maior deve ser o fator.

Apesar disso, segundo Norton (2013), para aeronaves os coeficientes de segurança variam de 1,2 a 1,5, devido ao excesso de peso que um coeficiente alto provocaria. E por que isso acontece? Imagine um cabo de aço. Para dimensionar seu diâmetro, você usa a carga máxima que lhe será aplicada. Quanto maior a carga, maior será seu diâmetro. Quando você aplica um coeficiente de segurança, aumenta a carga que será aplicada por este fator, então, o diâmetro do cabo será maior. Esse raciocínio vale sempre que um coeficiente de segurança for aplicado.



Refleta

Nem sempre o coeficiente de segurança é maior que a unidade. Em mísseis, por exemplo, o coeficiente de segurança é um. Você consegue imaginar por quê?

Existem normas que já sugerem coeficientes de segurança ou mesmo a tensão admissível do material para determinado uso. Por exemplo, a norma NBR 14712 estabelece as tensões admissíveis para diversos materiais para uso em elevadores de carga.

Cálculo de custos do projeto

Como definir os custos de um projeto? Inicialmente, você deve dividir os custos de sua máquina em duas categorias: fixos e variáveis. Os custos fixos são aqueles que não dependem da quantidade de peças fabricadas. Por exemplo, aluguel, gastos com pessoal administrativo, gastos gerais com água e energia elétrica (excluídos os valores gastos na produção), compra de equipamentos, os gastos de desenvolvimento deste projeto, alguns impostos, etc.

Custos variáveis são aqueles que variam conforme a quantidade de unidades produzidas. Por exemplo, matéria-prima, gastos com água e energia elétrica usados diretamente na produção, alguns impostos, entre outros.

Na comercialização do produto, você vai ter entrada de dinheiro pela venda de seu produto e vai ter gastos com ele, conforme explicado acima.

Existe um fator chamado **ponto de equilíbrio**, que determina o ponto exato em que a entrada de dinheiro é igual à saída, ou seja, você não tem lucro nem prejuízo na venda do produto. É fundamental conhecer o ponto de equilíbrio para seu produto (máquina), porque se

você vender menos unidades do que demonstra o ponto de equilíbrio, sua empresa terá prejuízo.

Quanto aos custos variáveis, é só inclui-los diretamente no cálculo. Já para os custos fixos, é preciso saber sua margem de contribuição para o produto em questão. Em outras palavras, é preciso fazer um rateio destes custos entre todos os produtos vendidos pela empresa. Esta é a parte mais complexa, pois depende de uma análise muito cuidadosa de tudo que é feito na empresa.

Outro indicador de grande utilidade é o Retorno de Investimento, cuja sigla é ROI (em inglês, *Return On Investment*). Seu cálculo é simples:

$$ROI = \frac{\text{Ganho} - \text{Investimento}}{\text{Investimento}}$$

Ganho significa todo o dinheiro arrecadado com a venda do produto, e investimento é tudo o que foi gasto com o produto. Este indicador é calculado em um determinado período de sua escolha.



Pesquise mais

Para entender o conceito de margem de contribuição, leia o artigo: SEBRAE NACIONAL. **Cartilha saiba mais:** o que é margem de contribuição? Sebrae Nacional, 19 jan. 2016. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/bis/cartilha-saiba-mais-o-que-e-margem-de-contribuicao,a45ab88efc047410VgnVCM2000003c74010aRCRD>. Acesso em: 25 out. 2018.

Para entender bem o conceito de ROI, acesse o seguinte artigo: BONA, A. **Retorno sobre investimento (ROI):** o que é e como calcular? Blog de Valor – Finanças e Investimentos, 14 jul. 2016. Disponível em: <https://andrebona.com.br/retorno-sobre-investimento-roi-o-que-e-e-como-calcular/>. Acesso em: 25 out. 2018.

Para calcular o custo do produto, inicialmente você deve definir as macrotarefas. Depois deve subdividi-las em tarefas menores. Esta subdivisão deve continuar até que você consiga estabelecer os parâmetros envolvidos na tarefa, tais como pessoas (cargos), horas trabalhadas, materiais empregados, processos de fabricação definidos, etc.



Exemplificando

Suponhamos que vamos projetar uma talha simples manual para levantamento de cargas em uma oficina mecânica e queiramos estimar o seu custo. Veja um esquema a seguir.

Componentes: ganchos, correntes, estrutura, engrenagens, parafusos, catraca e diversos.

Processos de fabricação: fundição, usinagem, estampagem, forjamento e caldeamento.

Profissionais envolvidos: 1 engenheiro mecânico (para o projeto), 1 técnico em fundição, 1 técnico em usinagens, 1 técnico em estampagem e 1 técnico em forjamento.

Os componentes descritos acima são considerados gastos variáveis.

Os gastos com processos de fabricação e horas dos profissionais mencionados devem ser avaliados de acordo com os produtos em que eles são alocados.

Agora é preciso estimar o número de horas de trabalho de cada profissional, o custo da matéria-prima e o tempo para os processos de fabricação. Com isso, é possível estimar o custo de nosso projeto.

Figura 1.4 | Talha manual simples



Fonte: <https://www.nowak.com.br/talhas-e-trolleys/talha-manual-corrente/talha-manual-de-corrente-500-kg-3m-elevacao-csm-ref-1535#prettyPhoto>. Acesso em: 25 out. 2018.

Escolha de materiais ferrosos e processos de fabricação

Quando se fala de projeto de alguma peça mecânica, é preciso falar do material com o qual ela será feita. Às vezes, ela pode ser feita de vários materiais, então, como selecionar os melhores materiais para uma determinada peça? Vários critérios devem ser empregados, os principais sendo custo, resistência mecânica, ductilidade, dureza, tenacidade, resistência à corrosão, densidade, processos de fabricação disponíveis e aparência.

Pode haver ainda outros fatores a considerar, mas são casos particulares. Logo, como decidir? O primeiro passo é calcular os esforços atuantes sobre a peça (máquina) e seus tipos (torção, compressão, etc.). Então, inicialmente você deve obter as propriedades dos materiais candidatos a serem usados no projeto. Resistência à tração, dureza e algumas outras propriedades podem ser obtidas em manuais, em catálogos de fabricantes e em outros lugares. Mas será que os dados que você obtém em um catálogo correspondem exatamente ao material que você tem? Dependendo da situação, é melhor efetuar os testes adequados para ter as propriedades corretas. Lembre-se: quanto melhor seu conhecimento dos materiais e processos, menor pode ser seu coeficiente de segurança.

Figura 1.5 | Máquina para ensaio de tração



Fonte: iStock.

Os testes mais comuns são os de tração, realizados com máquinas especiais, como a Figura 1.5 a seguir.

Para fazer um teste como esse é preciso criar um corpo de prova, para o qual existem dimensões padronizadas. O teste de tração, além de permitir conhecer o limite de resistência do material, também nos possibilita saber o seu módulo de elasticidade e seu coeficiente de Poisson.



Pesquise mais

Para que um ensaio seja válido, ele precisa usar procedimentos reconhecidos. A ABNT possui várias regras que dispõem sobre ensaios. Verifique o que diz a norma ABNT NBR ISO 6892-1, que trata de ensaios de tração na temperatura ambiente.

Veja um corpo de prova antes e depois do teste na Figura 1.6 a seguir.

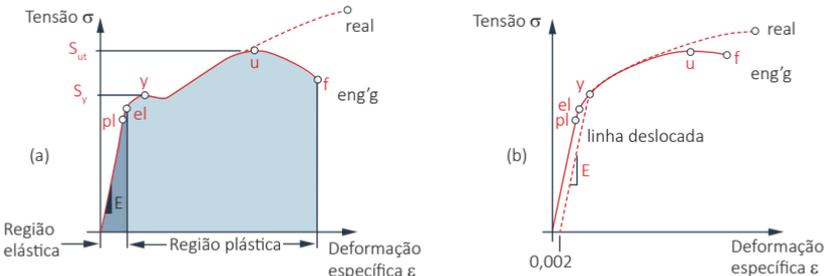
Por meio desses testes, é possível levantar a curva tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$) do material, como mostrado a seguir na Figura 1.7:

Figura 1.6 | Corpo de prova de ensaio de tração antes e depois do ensaio



Fonte: adaptado de Norton (2013, p. 33).

Figura 1.7 | Gráfico tensão x deformação para material dúctil e material frágil



Fonte: adaptado de Norton (2013, p. 32).



Assimile

Na região linear vale a equação:

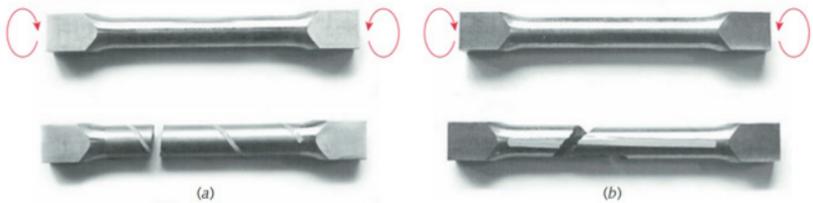
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Em que σ representa a tensão aplicada ao corpo, ε é a deformação relativa do corpo e E é o módulo de elasticidade do material.

Os ensaios de compressão são feitos a partir de corpos de prova cilíndricos, mas são bem menos frequentes que os de tração. Ensaios de flexão são empregados para obter a curva tensão x deformação do material para se prever falha em flexão.

Já os ensaios de torção são empregados para obter a tensão de cisalhamento limite do material. Nesses ensaios, um corpo de prova, semelhante ao da Figura 1.8, é preso na máquina de testes, que gira uma de suas extremidades até a fratura.

Figura 1.8 | Corpos de prova para ensaio de torção, para material dúctil e material frágil



Fonte: adaptado de Norton (2013, p. 34).

Na figura acima, o corpo (a) é de aço dúctil e o corpo (b) é de ferro fundido frágil. As linhas brancas foram pintadas nos corpos antes do ensaio ao longo de seu comprimento. Note que o corpo de material dúctil girou em torno de seu eixo várias vezes antes da ruptura. Por outro lado, o de material frágil não girou e simplesmente se rompeu. Com este ensaio, pode-se calcular a tensão de cisalhamento pela fórmula:

$$\tau = \frac{G \cdot r \cdot \theta}{L_0}$$

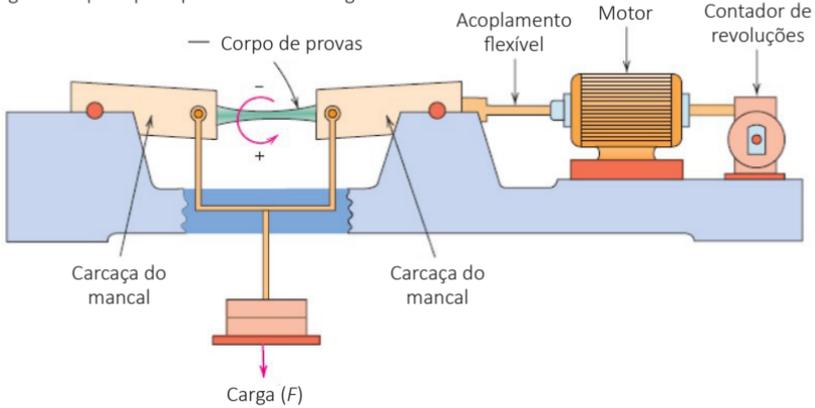
Em que τ representa a tensão de cisalhamento, G é o módulo de elasticidade transversal do material, r é o raio do corpo de prova, θ é o ângulo de rotação do corpo e L_0 é o comprimento de trabalho do corpo de prova. O valor de G pode ser obtido da relação:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Em que E é o módulo de elasticidade do material e ν é o coeficiente de Poisson do material.

Outro ponto de interesse dos materiais é a resistência à fadiga, pois este fenômeno ocorre com tensões abaixo da tensão limite de escoamento. Fadiga ocorre quando a peça é sujeita a solicitações variáveis no tempo. Os testes de resistência à fadiga são feitos com um corpo de prova semelhante ao que é usado em ensaios de tração. Neste corpo, que é preso nas extremidades, é aplicada uma carga de flexão no seu centro e o corpo é posto a girar. Veja um esquema na Figura 1.9 a seguir.

Figura 1.9 | Máquina para ensaio de fadiga



Fonte: adaptado de Callister Jr. (2016, p. 249).

Assim, tomando-se um ponto da superfície do corpo, ele sofrerá tração e depois compressão, alternando entre estas forças durante o giro. O ensaio é aplicado até que o corpo se rompa e, neste momento, registra-se o número de ciclos que ele suportou. Obtém-se, então, a curva de vida do material, conforme a Figura 1.10.

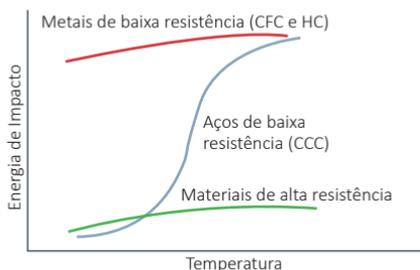
Figura 1.10 | Curva de vida do material



Fonte: adaptado de Norton (2013, p. 38).

Outro ponto importante a considerar nos materiais é sua resistência ao impacto. Ou seja, o que acontece com o corpo quando recebe um impacto repentino. Define-se tenacidade de um material como a sua capacidade de absorver energia por unidade de volume, sem se romper. Os testes de impacto permitem obter esses valores de energia. Existe uma situação particular de tenacidade que interessa muito à mecânica: materiais dúcteis, em determinadas circunstâncias, podem se comportar como frágeis. A temperatura é o fator que mais afeta esta característica. Se a energia que o material absorve é baixa, ele se rompe. Veja a Figura 1.11.

Figura 1.11 | Energia absorvida versus temperatura do teste



Fonte: adaptado de Callister Jr. (2016, p. 245).

Note que os aços de baixa resistência, que são bastante dúcteis, abaixo de uma determinada temperatura passam a absorver pouca energia, o que os torna frágeis. Isso é importante porque um material dúctil, ao sofrer um choque, ao invés de se amassar, pode romper-se.

Além de todos os testes listados acima, é preciso determinar se nossa peça será feita de metal ou de outro material. Não sendo de metal, pode ser de madeira, cerâmica ou compósito polimérico. Sendo de metal, poderá ser ferroso (aço ou ferro fundido) ou não ferroso (cobre, alumínio, bronze, etc.). Além dos critérios mencionados acima, a facilidade de obtenção do material também conta.

Escolha de materiais metálicos não ferrosos, materiais não metálicos e processos de fabricação

Os testes mencionados acima aplicam-se não apenas a aços e ferros fundidos, mas podem ser empregados para termos informações de metais não ferrosos (alumínio, cobre, bronze, etc.) e de materiais não metálicos (polímeros, madeira, cerâmica, etc.). Os processos de fabricação para esses materiais são semelhantes aos usados com ferrosos.

Os principais pontos a considerar na hora de selecionar um material são sua resistência mecânica e seu preço. Outros fatores também podem interferir na escolha, como condutividade elétrica ou térmica, resistência à corrosão e outros.

Isso quer dizer que, definido o projeto, faz-se a simulação de uso de cada material candidato a ser o escolhido. Estabelecidas as peças com os vários

materiais (levando-se em conta critérios técnicos), faz-se a comparação de preços. Assim, a escolha se torna mais fácil.

Feitas as considerações sobre os assuntos da aula, é chegado o momento de você aplicar seus conhecimentos. Passemos então à próxima etapa, que é a resolução da situação-problema proposta a você.

Sem medo de errar

Lembrando nossa situação-problema: você está coordenando o projeto de uma girafa para levantamento de peso e, agora que já existe um cronograma com as fases do projeto, você deve fazer uma seleção dos materiais a serem empregados na construção deste dispositivo. Defina os materiais por sua resistência e custo.

Inicialmente, você deve decidir quais peças serão feitas em sua empresa e quais serão compradas prontas. Normalmente, peças que podem ser compradas são mais baratas do que fazê-las na empresa, mas para tomar uma decisão coerente, você deve verificar, para cada peça, quais as matérias-primas seriam compradas, quais processos de fabricação seriam envolvidos e quais profissionais trabalhariam nesta peça.

Comece pelo projeto (calcule as horas do pessoal que participaria do projeto) e depois vá para a fabricação. Veja os custos de cada máquina envolvida com seu operador e estime o tempo necessário. Feito isso, você terá o custo aproximado da peça para ser feita na própria empresa. Compare este valor com o de adquirir a peça fora, então, decida.

Para o cálculo do projeto, não se esqueça de definir os custos da máquina divididos em duas categorias: fixos e variáveis. Para os fixos, utilize os valores de aluguel, gastos com pessoal administrativo, gastos gerais com água e energia elétrica (excluídos os valores gastos na produção), compra de equipamentos, gastos de desenvolvimento deste projeto, alguns impostos, entre outros.

Para os custos variáveis, em função das quantidades de unidades produzidas, utilize valores referentes à matéria-prima, gastos com água e energia elétrica usados diretamente na produção, alguns impostos e outros. Determine o ponto de equilíbrio para ter uma visão do momento em que o lucro ocorrerá e calcule também o Retorno de Investimento (ROI), por meio da fórmula.

$$ROI = \frac{\text{Ganho} - \text{Investimento}}{\text{Investimento}}$$

A estrutura deve ser de material resistente, mas com uma certa ductilidade. Considerando as características de resistência, ficamos com ligas ferrosas, pois têm boa resistência e baixo custo. Não se esqueça de calcular o coeficiente de segurança, a fim de confirmar a adequação de cada material ao seu uso e os esforços que sofrerá. Ferros fundidos não devem ser usados na estrutura porque são muito frágeis e podem sofrer trincas com choques. Aços de baixo carbono não devem ser usados porque, embora tenham muita ductilidade, sua resistência não é boa. Aços de médio carbono são adequados. No Brasil, a norma que define a composição e a nomenclatura dos aços carbono e ligados é a NBR-NM 87:2000. Para nosso caso, o aço ABNT 1045 deve ser adequado, então, a estrutura básica pode ser de cantoneiras desse aço.

Utilize a Tabela 1.5 para definir o fator de segurança e observe o nível de informação fornecida. Temos:

Tabela 1.5 | Sugestões de fatores de segurança para materiais dúcteis

Informações	Qualidade das informações	Fator
Dados das propriedades dos materiais disponíveis a partir de testes	O material realmente utilizado foi testado	F1
	Datos representativos de testes do material estão disponíveis	1,3
	Dados razoavelmente representativos de testes do material estão disponíveis	2
	Dados insuficientemente representativos de testes do material estão disponíveis	3 5+
Condições ambientais nas quais será utilizado	São idênticas às condições dos testes de materiais	F2
	Essencialmente igual ao ambiente de um laboratório comum	1,3
	Ambiente moderadamente desafiador	2
	Ambiente extremamente desafiador	3 5+
Modelos analíticos para forças e tensões	Os modelos foram testados em experimentos	F3
	Os modelos representam precisamente o sistema	1,3
	Os modelos representam aproximadamente o sistema	2
	Os modelos são aproximações grosseiras	3 5+

Fonte: Norton (2013, p. 19).

Com base na tabela 1.5, foi definido fator 1,3 mostrando que o material realmente foi testado pelas informações de dados das propriedades dos materiais disponíveis, fator 3 mostrando que o ambiente no qual será utilizado é moderadamente desafiador e fator 3 mostrando que os modelos representam aproximadamente o sistema, no que se refere aos modelos analíticos para força e tensão. Assim, temos que:

$$N_{Dúctil} = \text{máx}(F_1; F_2; F_3) = \text{máx}(1,3; 3; 3) = 3$$

Pela Tabela 1.6, temos que para pás, guindastes e escavadeiras, o fator de segurança é 5.

Quanto aos processos: as cantoneiras definidas devem ser soldadas nas posições adequadas para definir o perfil da estrutura. O tipo de solda empregado pode ser eletrodo revestido, que é simples e barato, ou ainda por processo MAG ou arco submerso, que são processos mais caros, mas com melhor qualidade. Qual destes processos deve ser escolhido? Vai depender da disponibilidade do processo e dos custos envolvidos.

Para tomar essa decisão, é preciso verificar com o setor de soldagem o custo de cada um dos processos (supondo que a empresa tenha todos eles), incluindo consumíveis e operador. Depois é preciso julgar a qualidade do serviço final em cada tipo de soldagem. De posse desses dados, é possível decidir, levando em conta custo e qualidade. As correntes ou o cabo de aço são comprados prontos, bem como todos os parafusos. O gancho deve ser de aço de alto carbono para ter muita resistência, por exemplo, aço ABNT 1080, e deve ser feito a partir de uma barra por processo de forjamento. A catraca pode ser comprada pronta ou feita de aço de médio carbono. Para as engrenagens do sistema de redução vale a mesma observação. Essas peças, caso sejam feitas na empresa, serão confeccionadas por um centro de usinagem. As rodas são compradas prontas.

Avançando na prática

Construção de um gabarito de soldagem

Descrição da situação-problema

Na construção da girafa que você está coordenando, será preciso fazer várias soldas. Para que as soldas saiam com qualidade e em todas as girafas elas sejam semelhantes, é preciso criar um gabarito, e você foi encarregado de construí-lo para a soldagem. Com qual material você fará o gabarito?

Resolução da situação-problema

Um gabarito de soldagem é feito para posicionar as peças a serem soldadas de maneira precisa e rápida, de forma a liberar o soldador das tarefas auxiliares, então, ele deve ser feito para permitir a montagem das peças da melhor forma possível. Uma soldagem atinge temperaturas muito elevadas. Se o metal-base for o aço, essa temperatura

pode facilmente atingir os 1.800 °C, o que significa que o material do gabarito deve aguentar essas temperaturas, ou seja, todos os metais não ferrosos estão descartados. Madeira e materiais poliméricos, idem. Sobram os ferrosos. Também vamos descartar os ferros fundidos pela dificuldade de sua manipulação (por ser muito duro, é difícil moldá-lo), então, ficamos com os aços. Mas qual tipo de aço? Considerando que o gabarito não sofre esforços significativos, podemos fazê-lo de um aço de baixo carbono e baixo custo. O ideal é usar o ABNT 1020.

Faça valer a pena

1. Sempre que se projeta uma máquina, existem incertezas envolvidas, que podem ser devido às cargas atuantes, a fatores ambientais ou outros. Para contornar esse problema, um coeficiente de segurança é aplicado em todos os projetos que envolvam cargas que devem ser suportadas. Nas afirmações a seguir, marque V para verdadeiro e F para falso em cada uma.

() No projeto da estrutura de uma ponte rolante, quanto maior o coeficiente de segurança aplicado, melhor será a ponte rolante.

() Para a estrutura de aeronaves, os coeficientes de segurança devem ser muito elevados, por envolver vidas.

() Quanto maior a incerteza nos fatores envolvidos, maior deverá ser o coeficiente de segurança.

Agora escolha a alternativa correta.

a) F – F – V.

b) F – F – F.

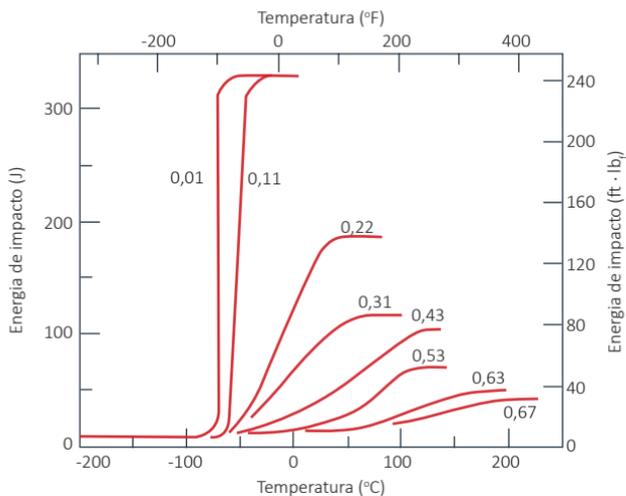
c) V – F – F.

d) V – V – V.

e) V – V – F.

2. Os ensaios de tenacidade à fratura (ou ensaios de impacto) são empregados para se determinar em um corpo de prova (CP) a energia de um impacto que é absorvida por ele. Os principais ensaios deste tipo chamam-se Charpy e Izod e diferenciam-se principalmente no tipo de CP utilizado. Normalmente, estes ensaios são repetidos, variando-se apenas a temperatura do CP, de forma a se estabelecer uma curva de “energia absorvida” *versus* “temperatura”. A Figura 1.12 ilustra curvas deste tipo obtidas para vários aços carbono, variando-se o teor de carbono da liga.

Figura 1.12 | Energia absorvida *versus* temperatura



Fonte: adaptado de Callister Jr. (2016, p. 247).

Com relação aos resultados mostrados nesta figura, considere as seguintes asserções:
I. Aços com teor de carbono baixos ($C < 0,2\%$) não devem ser empregados para construção de peças que trabalharão em temperaturas criogênicas ($T < -100^\circ\text{C}$) e sofrerão impactos.

II. Em temperaturas mais elevadas ($T > 50^\circ\text{C}$), quanto maior o teor de carbono do aço, mais frágil ele é.

III. O gráfico mostra que aços com alto teor de carbono ($C > 0,65\%$) têm baixa fragilidade.

Com relação às asserções acima, marque a alternativa correta.

- a) Todas as afirmações são corretas.
- b) Apenas as afirmações I e II são corretas.
- c) Apenas a afirmação I é correta.
- d) Apenas a afirmação III é correta.
- e) Todas as afirmações são incorretas.

3. Quando se projeta uma peça, um dos passos mais importantes é a definição do material. A escolha deste material baseia-se em vários fatores, tais como custo, resistência à tração, dureza, ductilidade, coeficiente de dilatação e vários outros. Para os metais, uma das formas de se determinar a resistência do material é efetuar um ensaio de tração.

Sobre os ensaios de metais, então, considere as seguintes asserções e a relação entre elas.

I - Um ensaio de tração pode não determinar a tensão de escoamento do material

PORQUE

II - Somente materiais dúcteis apresentam tensão de escoamento.

Acerca dessas asserções, assinale a opção correta.

- a) Tanto a primeira quanto a segunda asserções são proposições falsas.
- b) As duas asserções são proposições verdadeiras, e a asserção II é uma justificativa correta da asserção I.
- c) As duas asserções são proposições verdadeiras, mas a asserção II não é uma justificativa correta da asserção I.
- d) A asserção I é uma proposição verdadeira, e a II, uma proposição falsa.
- e) A asserção I é uma proposição falsa, e a II, uma proposição verdadeira.

Métodos, custos, ferramental, seleção de materiais, cronograma

Diálogo aberto

Prezado aluno,

Ao longo do desenvolvimento dos trabalhos, você pôde perceber até aqui como é importante desenvolver projetos para a concepção de um produto. No nosso caso, esse aspecto ganha bastante relevância, pois há especificações técnicas que devem ser observadas para garantir o sucesso e/ou conformidade de um equipamento. Nesta seção, apresentaremos as etapas a serem seguidas em um projeto de máquinas, compreendendo, nesse contexto, os custos envolvidos, sejam do ferramental, do processo em si, da própria seleção dos materiais ou de cronograma. Apresentaremos um estudo de caso, para proporcionar a você o entendimento dos fatos relevantes envolvendo a elaboração de um projeto de máquinas.

Para que você possa alcançar esse entendimento, lembre-se do contexto de aprendizagem desta unidade, em que você foi contratado por uma empresa que constrói máquinas e equipamentos diversos, principalmente sob encomenda.

Agora, para esta seção, propomos a você a seguinte atividade: você está coordenando o projeto de uma girafa para um cliente e, agora, deve fazer uma estimativa de custos do equipamento. Para isso, você deve listar os componentes necessários e suas quantidades, bem como deverá estimar as horas de trabalho e os insumos necessários. As dimensões básicas da girafa são:

- Altura: 1.700 mm;
- Comprimento: 1.300 mm;
- Comprimento da lança: 1250 mm;
- Curso do pistão: 290 mm.

Os materiais a serem adquiridos prontos são: rodízios, pistão hidráulico, parafusos, porcas e arruelas.

Toda a estrutura da girafa será feita de cantoneiras e chapas de aço carbono ABNT 1020. A lança será feita por meio de estampagem e soldagem. O gancho será feito de um tarugo de aço de médio carbono (ABNT 1045) forjado. Veja uma tabela com um resumo do que será adquirido.

Tabela 1.7 | Itens a serem adquiridos

Item	Unidade	Quant.	Preço unit (R\$)
Rodízio	Peça	3	200,00
Cantoneira (1)	m	4	80,00
Chapa (2)	m ²	2	130,00
Tarugo (3)	Peça	1	15,00
Pistão hidráulico	Peça	1	300,00
Diversos (4)			

Fonte: elaborada pelo autor.

Dados adicionais: (1) em L com 4 “ x 6 mm de espessura.

(2) com 3 mm de espessura.

(3) secção quadrada de 20 mm com 300 mm de comprimento.

(4) inclui parafusos, porcas e arruelas.

Os processos de fabricação envolvidos são: estampagem, soldagem, forjamento, usinagem e pintura. Para a soldagem, devemos definir o tipo, e o melhor para esse caso é a solda por eletrodo revestido, que é de boa qualidade e barata. Os profissionais envolvidos e que devem ter suas horas de trabalho estimadas são: soldador, operador de forja, operador de estampo, fresador e pintor. O custo dos insumos de solda e pintura também devem ser previstos. Para nosso caso vamos usar a Tabela 1.8.

Tabela 1.8 | Custos em processos de fabricação

Item	Horas	Custo Unitário (R\$)
Soldagem	4	30,00
Forjamento	1	40,00
Usinagem	2	30,00
Estampagem	1	30,00
Pintura	1	30,00

Fonte: elaborada pelo autor.

A partir desses dados, lhe foi solicitado estimar o custo total do projeto, então você levanta as seguintes questões: há parâmetros para listar os componentes necessários ao projeto? Pode-se fazer um levantamento das quantidades de cada elemento de máquina necessário? É possível estimar as horas de trabalho? Qual o custo aproximado do projeto?

Nas primeiras seções, você aprendeu os conceitos de projetos de máquinas e viu como planejar as etapas para o desenvolvimento do projeto, incluindo

um cronograma e uma estimativa de custos. Estudou também a importância e a definição dos fatores de segurança, que garantem que a máquina funcionará corretamente. Você também aprendeu como escolher os melhores materiais para as peças da máquina e os processos de fabricação envolvidos.

Então, mãos à obra e bons estudos!

Não pode faltar

Segundo Norton (2013), um projeto de engenharia pode ser definido como “o processo de aplicação das várias técnicas e princípios científicos com o intuito de definir um dispositivo, um método ou um sistema suficientemente pormenorizado para permitir sua realização”. Diante dessas considerações, imagine em uma determinada situação os passos ou etapas que poderiam ser dados a fim de desenvolver um projeto de um equipamento. Nesse caso, podemos pensar que a sua empresa foi contratada para projetar e fabricar um ventilador de mesa caseiro (note que um ventilador é uma máquina de fluxo). Nas premissas de projeto, é indicado que o ventilador deve ser de baixo custo, para atender às classes D e C. Então, é necessário, nesta fase, definir os materiais a serem empregados, fazer um cronograma aproximado do projeto e ter uma estimativa de custos do ventilador. Você deve, também, verificar a confiabilidade do ventilador, portanto, use os coeficientes de segurança para isso. Quais são os elementos mecânicos utilizados no projeto em que um cálculo ou especificação de fator de segurança se faz necessário?

Faça uma análise da complexidade do projeto, considerando, principalmente, qual deverá ser a principal característica desejada para essa máquina de fluxo. Divida a máquina em subconjuntos e determine as funções de cada um deles. Você pode elaborar uma planilha para guiá-lo pelo projeto, em que constem, para cada peça (conjunto), os processos de fabricação envolvidos e todos os demais detalhes. Quais são os componentes de maior preço? No mercado, existem similares com preços menores?

Seguiremos as etapas definidas pela metodologia de projetos que adotamos neste livro.

Etapa 1: identificação da necessidade

A necessidade veio do cliente, que especificou o produto desejado. Os principais detalhes já foram definidos por ele: um ventilador de mesa com mecanismo de oscilação e três velocidades. Deve ficar clara a função da máquina a ser projetada. Desta forma, a principal função dessa máquina de fluxo é movimentar o ar que passa entre suas pás, aumentando a energia

cinética e o movimento da massa de ar que passa pelas palhetas. Os demais fatores podem ser definidos pela equipe de projeto. Considerando que será um ventilador de baixo custo, isso deverá ser levado em conta nas fases posteriores.

Etapa 2: busca de informações

Definido o que projetar, é preciso juntar informações sobre os ventiladores existentes. Não é tarefa difícil, afinal, quase todo mundo tem um ventilador em casa, então, o que se deve fazer é pesquisar as potências, as vazões de ar e as dimensões dos ventiladores existentes, de diversas marcas e modelos, mas direcionados a um custo relativamente baixo. A tabela a seguir mostra alguns desses ventiladores.

Tabela 1.9 | Valores Comparativos de Ventiladores

Marca	Modelo	Hélice - diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Potência (W)	Nº de pás	Preço (R\$)
CADENCE	Eros 2 40	0,4	0,97	79,68	6	150,00
CADENCE	Windy	0,3	0,686	47,7	3	120,00
MALLORY	Ozônic	0,4	0,75	63	6	230,00
MALLORY	Princesas	0,3	0,5	32	4	130,00
MALLORY	Turbo Silence High	0,4	1,039	94,7	6	230,00
MONDIAL	NV-41	0,4	0,893	78,1	6	140,00
MONDIAL	V-45	0,4	0,88	78	3	120,00
ARNO	Turbo Silêncio Maxx	0,4	1,16	88,9	6	179,00
ARNO	Alivio	0,3	0,68	51	4	140,00

Fonte: adaptado de <https://www.proteste.org.br/eletrodomesticos/ventilador/teste/ventilador/results>. Acesso em: 9 nov. 2018.

Na tabela acima, os preços foram coletados apenas para uma comparação simples e não fazem parte da tabela original. A maioria dos ventiladores tem seu corpo feito de polipropileno. Os motores podem ser de 110 V ou 220 V. São raros os bivoltos (por encarecer o produto). Todos têm três velocidades.

Etapa 3: definição dos objetivos

Agora que já temos as informações básicas sobre nosso projeto, vamos estabelecer nossos objetivos. Isso deve ser feito por uma equipe multidisciplinar, que inclua engenheiros, economistas, pessoas de marketing e outros profissionais que possam colaborar com o projeto.

De acordo com as informações obtidas, podemos definir que nosso ventilador de mesa terá pás com 30 ou 40 cm de diâmetro, 3 velocidades, poderá funcionar apenas com uma voltagem ou com as duas existentes. Além disso, deverá consumir entre 70 W e 100 W e fornecer uma vazão de ar entre $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$, podendo apresentar 3, 4 ou 6 pás. Deverá ser um ventilador eficiente: de acordo com os critérios do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), que fornece um selo para os eletrodomésticos, deverá ser classificado como classe A. O corpo do ventilador será de polipropileno e poderá ser fabricado em diversas cores, para agradar os consumidores.

Etapa 4: especificação das tarefas

Nesse passo, devemos definir as tarefas que serão executadas nas próximas etapas. Essas tarefas guiarão a equipe para que o projeto se desenvolva conforme desejado, por meio de análises e da definição das melhores especificações, que limitam o alcance a ser investigado.



Assimile

Apesar de serem definidas as tarefas e distribuídas para as pessoas adequadas, elas serão executadas somente quando o projeto estiver melhor definido, do contrário, muito trabalho seria desperdiçado.

As principais tarefas a serem executadas são:

- Escolha do motor mais adequado: deve-se levar em conta o preço, a qualidade, a resistência, a facilidade de manutenção, o atendimento local, entre outros.
- Cálculos referentes à pá: deverão ser feitos cálculos aerodinâmicos para verificar o formato da pá, fazendo simulações com a quantidade delas: 3, 4 ou 6. Além disso, o ângulo de ataque da pá deverá ser variado também para se decidir qual o melhor a ser adotado, em função da eficiência do conjunto. Ainda, devem ser feitos cálculos estruturais para as pás e sua estrutura.
- O suporte deve ser calculado para que o ventilador não caia sob nenhuma circunstância, mesmo quando estiver oscilando ou girando.
- O espaçamento da grade deve ser calculado de forma que seja grande o suficiente para não interferir no fluxo de ar e pequeno o bastante para impedir que dedos ou instrumentos acessem as pás.
- Deve ser feito um desenho do ventilador final em programa CAD 3D.

- Os fornecedores de todos os componentes comprados prontos (parafusos, porcas, fiação, conectores) devem ser definidos.
- O fornecedor da estrutura em polipropileno (a ser feita por injeção) deve ser definido em função de preços, prazos, confiabilidade, entre outros fatores.
- Devem ser definidos os equipamentos para testes do ventilador. Seus fornecedores também devem ser definidos.
- Deve ser feita uma previsão do custo do ventilador para que se estime o preço de venda.
- Cada uma dessas tarefas deve ser dirigida a um determinado grupo de pessoas com a formação adequada para cumpri-las.

Etapa 5: síntese

Definidas as tarefas, é necessário imaginar todos os tipos de ventilador possíveis de serem fabricados, nos deixando levar pela imaginação para as diferentes formas de nosso dispositivo. Para isso, uma das formas recomendada é promover uma “discussão livre”, ou *brainstorming*. Uma pessoa é colocada como líder do grupo de discussão e orienta todos a compartilharem suas ideias livremente. Os participantes desse grupo não precisam ser apenas técnicos. Deve haver engenheiros (mecânicos, eletricitas, de produção), mas deve haver também pessoas que representem os consumidores do produto. O líder anota tudo e detalha cada ideia o máximo possível. Nessa fase não deve haver censura, pois neste momento devem ser geradas quantas soluções criativas forem possíveis. Às vezes, bons projetos surgem de ideias aparentemente absurdas.



Exemplificando

Pode surgir a ideia de fazer um ventilador com rodinhas, que caminhe pela sala ao invés de ficar estático. Ou mesmo, colocar um sensor que detecte a velocidade do ar para que o ventilador seja colocado na janela e “amplifique” o vento que vem de fora. Mesmo as ideias que não servirão agora poderão ser repensadas no futuro para outros projetos.

Apesar da liberdade que os participantes têm, os objetivos estabelecidos na etapa 3 devem ser respeitados. Então, suponhamos que as propostas que surgiram foram as seguintes:

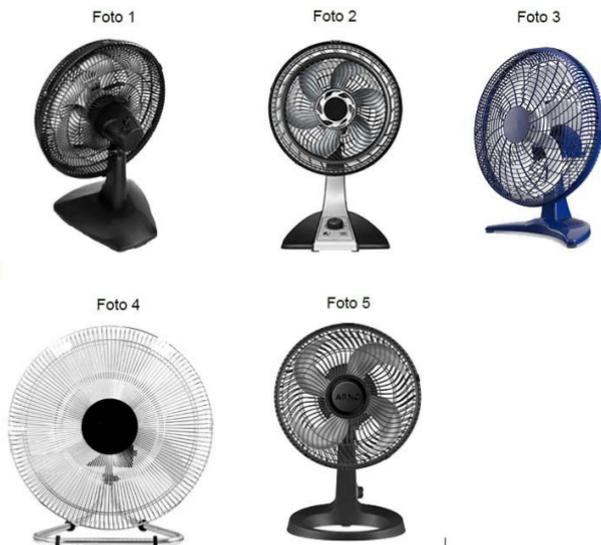
Tabela 1.10 | Propostas para o projeto do ventilador

Opção	Nº de pás	Potência	Vazão de ar	Estrutura + Pedestal	Extras
1	6	80	1,0	Foto 1	--

Opção	Nº de pás	Potência	Vazão de ar	Estrutura + Pedestal	Extras
2	6	80	1,0	Foto 1	Controle remoto
3	4	100	1,1	Foto 2	
4	3	90	0,7	Foto 3	
5	4	60	0,8	Foto 4	Controle remoto
6	4	60	0,8	Foto 4	
7	3	90	0,9	Foto 5	
8	6	90	1,0	Foto 5	
9	4	90	0,9	Foto 3	

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 1.13 | Tipos de Ventiladores



Fonte: adaptado de <https://www.proteste.org.br/eletrodomesticos/ventilador/teste/ventilador/results>. Acesso em: 29 out. 2018.

Na Figura 1.13, considere apenas a estrutura e o pedestal. O número de pás não deve ser levado em conta.

Etapa 6: análise

Com várias propostas de projetos de ventiladores, precisamos restringir nosso universo a um número reduzido de opções. Como o cliente especificou que seria um ventilador de baixo custo, vamos eliminar as opções com controle remoto, ou seja, opções 2 e 5. Muitas decisões nessa fase dependem da opinião dos consumidores. Por isso, uma pesquisa de mercado seria muito

bem-vinda para não cometermos o erro de decidir por uma solução que os consumidores não querem. Outra alternativa seria usar um QFD (*Quality Function Deployment*, ou Desdobramento da Função Qualidade).



Pesquise mais

Pesquisas de mercado são fundamentais para o sucesso de muitos empreendimentos. O sucesso no lançamento de um produto depende muito da aceitação do produto pelo seu público consumidor. Isso somente pode ser avaliado por uma pesquisa. Para entender melhor sobre o assunto, leia o artigo indicado:

SERÁ que está na hora do seu negócio realizar uma pesquisa? [S.l.; s.d.]. Endeavor Brasil. Disponível em: https://endeavor.org.br/marketing/realizar-pesquisa/?gclid=EAlaIqobChMIInqSfgNTP3QIVEYORCh2HUAitE-AAYBCAAEgIS_D_BwE. Acesso em: 12 nov. 2018.

Analisando os ventiladores concorrentes, vemos que podemos desenvolver nosso ventilador com 3, 4 ou 6 pás (ventiladores de teto podem ter 2 pás ou até mesmo uma única). Você pode utilizar algumas ferramentas disponíveis no mercado para busca, monitoramento e aquisição de dados de concorrentes, por exemplo, SEMRush e GoogleKeyword Planner.

É importante salientar que o número de pás interfere pouco no desempenho, na ventilação e no consumo de energia. Portanto, a escolha deve se basear na estética (aparência) e no motor. A impressão que as pessoas têm é a de que mais pás significam que o ventilador é mais potente e gera maior ventilação. Isso as atrai. Por outro lado, mais pás significam mais manutenção no conjunto, maior probabilidade de falhas e necessidade de motor mais potente (devido à inércia e peso do conjunto), o que implica maior custo.



Assimile

Propostas inviáveis, por questões técnicas em relação a sua produção, montagem ou funcionamento, devem ser descartadas, assim como as que não atendam aos requisitos impostos pelo cliente. Desta forma, custo se torna muito importante para nosso projeto.

A opção 4 será descartada porque apresenta um consumo muito elevado para a ventilação sugerida. Assim, restam seis propostas consideradas viáveis pela equipe de projeto. Dessas, devemos escolher uma para seguir com o projeto.

Etapa 7: seleção

Com base nas 6 propostas remanescentes, devemos ter uma maneira de selecionar aquela que será levada adiante. Mas, como fazer isso? A melhor maneira é usar uma matriz de decisão. Essa matriz torna objetivos os conceitos subjetivos, o que ajuda muito na tomada de decisões. Ela apresenta, na primeira linha, os fatores a serem usados para a comparação entre as propostas e, na primeira coluna, as propostas. A construção dessa matriz é complexa. Depende de uma equipe multidisciplinar que vai elencar quais fatores são importantes na comparação entre os projetos. Depois de definidos os fatores, deverá ser atribuído a cada um deles um peso ou importância relativa. Definida a matriz, outra equipe deverá dar notas para os projetos em cada fator definido.



Refleta

Mencionamos que a equipe que atribui as notas deve ser diferente da que definiu os fatores e estabeleceu os pesos. Por que é tão importante manter duas equipes para execução do processo de seleção e para os resultados obtidos na aplicação da matriz de decisão?

No nosso caso, a matriz teria os seguintes fatores e pesos:

- Custo – 5.
- Aparência – 5.
- Consumo – 3.
- Capacidade de ventilação – 2.
- Facilidade de manutenção – 1.

Poderia haver outros fatores, mas esses são suficientes para decidirmos. Com esses dados, a segunda equipe pode atribuir notas a esses fatores, para cada projeto. Em seguida, será feita a média ponderada para cada projeto, e o que tiver a maior média será o escolhido. Nossa matriz de notas é mostrada na Tabela 1.11, em que a linha logo abaixo dos fatores indica o peso relativo de cada fator.

Tabela 1.11 | Notas e médias das propostas de projetos

Fator →	Custo	Aparência	Consumo	Ventilação	Manutenção	Total
↓ Projeto	5	5	3	2	1	16
1	2	3	5	4	2	3,13
3	1	5	1	5	4	2,94

Fator →	Custo	Aparência	Consumo	Ventilação	Manutenção	Total
↓ Projeto	5	5	3	2	1	16
6	3	3	5	2	4	3,31
7	5	2	2	3	3	3,13
8	5	3	2	4	2	3,5
9	4	5	2	3	3	3,75

Fonte: elaborada pelo autor.

A coluna “Total” nos dá a média ponderada de cada proposta de projeto. Podemos notar que a opção 9 foi a que teve a melhor média e, portanto, é a escolhida. Note que, ao longo da próxima fase, se for encontrado algum problema sério que não possa ser resolvido de forma satisfatória, é possível voltar a esta fase e selecionar a próxima opção (neste caso, a opção 8).

Etapa 8: detalhamento do projeto

Já temos nosso projeto básico, agora precisamos detalhá-lo. Inicialmente, temos que definir o que será comprado pronto. Essas peças são:

- Motor elétrico.
- Parafusos, pinos, porcas e arruelas.
- Fiação.
- Conector.
- Também o que deve ser produzido pela empresa:
- Carcaça.
- Pedestal.
- Pás.
- Redutor.
- Braço oscilante.
- Botões.
- Grade.

Para os produtos comprados prontos, os materiais já estão decididos, mas, para os que serão feitos pela empresa, precisamos fazer a escolha dos materiais. Para a carcaça e o pedestal devemos empregar um polímero, devido a seu peso, facilidade de atribuição de cores e ausência de corrosão. O polímero mais empregado para isso é o polipropileno. A resistência não chega a ser um problema grave, desde que o projeto seja

bem feito. O processo de fabricação empregado será a injeção. Então, precisaremos de um molde (ou matriz) para ser usado na máquina injetora para cada uma dessas peças.

As pás também serão feitas de um polímero, pelos mesmos motivos acima. Possivelmente será usado o polipropileno ou o poliestireno. Também será usado o processo de injeção e, por isso, será necessário um molde. Uma observação deve ser feita: moldes para processos de injeção são muito caros por serem produzidos em centros de usinagem ou por processo de eletroerosão. Portanto, eles só se justificam quando usados para produzir grandes lotes de peças, assim seu preço se dilui na quantidade de peças. Os botões e a grade também serão de um polímero e, possivelmente, de polipropileno também. Como a empresa utilizará injetoras, essas peças também serão produzidas por esse processo.

O redutor é composto de engrenagens, que serão de aço carbono. Para fabricá-las, será usado o processo de usinagem por fresamento. Será usada uma fresadora CNC ou um centro de usinagem. O braço oscilante será de aço carbono e será produzido por estampagem. Todas essas peças deverão ser desenhadas em um programa de CAD (SolidWorks, Autodesk Inventor, AutoCAD ou qualquer outro). Deverá haver desenhos em vistas e desenhos tridimensionais, que permitam analisar as peças em 3 dimensões e analisar as montagens. Isso é importante para que as especificações estejam disponíveis por meio de desenhos, listas e outros documentos. Todos os fornecedores devem ser definidos.

Etapa 9: prototipagem

Detalhado o projeto, e antes de se iniciar a produção em série, é muito importante ter certeza de que tudo sairá bem, ou seja, de que o ventilador funcionará a contento. Sempre que possível, os resultados dos testes devem ser comparados às especificações definidas e às normas pertinentes ao tipo de máquina projetado. Podemos começar com maquetes eletrônicas (feitas nos programas de CAD citados anteriormente) e depois partir para protótipos físicos.

Os primeiros protótipos serão para medir a ventilação, então, deverão conter o motor e a hélice, sem preocupação com o resto. Várias medições serão feitas para validar os cálculos feitos sobre o fluxo de ar. Outros protótipos serão feitos para testar a oscilação do conjunto. Eles terão o motor, a hélice e a estrutura. Os últimos protótipos serão do ventilador completo, para testar o funcionamento total. Note que protótipos são caros e devem ser feitos com muita certeza de sua necessidade.

Etapa 10: produção

Vencidas todas as etapas anteriores, chegamos à fase de produção. Mais uma vez, é bom lembrar que, antes de colocar o ventilador em produção, é preciso fazer pesquisas de mercado para termos certeza de que ele será bem acolhido pelo público consumidor. Durante essa fase, eventuais defeitos no produto poderão ser detectados (pela equipe ou pelos consumidores), que deverão ser corrigidos o mais breve possível, para que a imagem de nosso produto não seja prejudicada. A direção da empresa também deve ficar atenta aos níveis de venda do produto: em caso de aumento, deve adequar a produção aos novos números; em caso de queda, além da adequação da produção, deve descobrir o motivo para tentar reverter essa tendência.

Cronograma

Um cronograma bem feito é muito importante para o desenvolvimento de qualquer produto. Para o nosso ventilador, nosso cronograma seria como o mostrado na Tabela 1.12, supondo que o início do projeto será no começo de março. As etapas indicadas são as descritas acima.

Tabela 1.12 | Cronograma do projeto

Tarefa	02/03-06/03	06/03-16/03	13/03-30/03	30/03-15/04	15/04-30/04	30/04-15/05	15/05-30/05	30/05-10/06	10/06-30/06	30/06-30/07	30/07-30/08	30/08-
Etapa 1												
Etapa 2												
Etapa 3												
Etapa 4												
Etapa 5												
Etapa 6												
Etapa 7												
Etapa 8												
Etapa 9												
Etapa 10												

Fonte: elaborada pelo autor.

Obviamente, a duração de cada etapa depende (e muito) do número de pessoas envolvidas.

Custo do produto

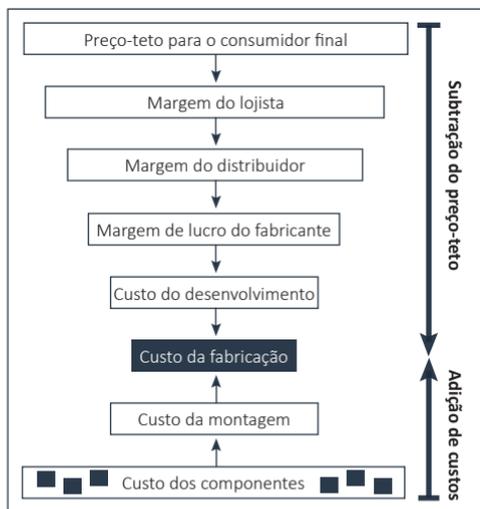
É claro que um produto, para ser posto à venda, deve ter atrativos para seu público consumidor, e esses atrativos devem tornar esse produto mais desejável que os concorrentes. Normalmente, um desses atrativos é o preço do produto. Embora haja exceções a essa regra, quanto mais barato um produto, mais atrativo ele se torna para seu público-alvo. Então, precisamos ter uma estimativa do custo de nosso ventilador para que ele entre no mercado com um preço convidativo.

Para as peças que serão compradas, precisamos da estimativa de preço de cada uma. Depois, podemos fazer a soma de custo de cada peça, multiplicado pelo número de peças que serão usadas no ventilador.

Para as partes que serão fabricadas na própria empresa, precisamos cotar a matéria-prima e verificar os custos de produção. No caso das peças injetadas, temos que levar em conta o preço da injetora e o preço do molde. Ambos serão amortizados pela estimativa do número de peças que fabricarão. Também temos que levar em conta a mão de obra envolvida na fabricação. Por último, temos que levar em conta o custo do projeto do ventilador. Ou seja, todos os gastos com a equipe envolvida no projeto, incluindo peças e materiais adquiridos, até que as primeiras unidades sejam colocadas à venda. Na Figura 1.14, essa forma de cálculo é o que chamamos de método de adição de custos.

Uma forma alternativa de calcular esse custo é fazer o caminho contrário: partimos do preço que nosso produto terá no mercado e depois subtraímos dele alguns fatores, conforme se pode ver na Figura 1.14.

Figura 1.14 | Cálculo do custo de fabricação de um produto



Fonte: adaptado de Baxter (2003).

Estabelecemos o preço teto do produto de forma que ele seja atrativo para seu público-alvo. Em seguida, subtraímos as margens do lojista e do distribuidor, retiramos a margem de lucro do fabricante e, por fim, o custo do projeto.

O que sobra é o custo de fabricação. Agora nossa missão é descobrir se é possível fabricar esse ventilador pelo preço que calculamos. Além disso devemos, também, calcular o Retorno de Investimento (ROI), visto anteriormente. Caso não seja possível, algo terá que ser melhorado nesta sequência.

Sem medo de errar

Você está coordenando o projeto de uma girafa para um cliente. Agora, você deve fazer uma estimativa de custos do equipamento. Para isso, deve listar os componentes necessários e suas quantidades. Também deverá estimar as horas de trabalho e insumos necessários. As dimensões básicas da girafa são:

- Altura: 1.700 mm.
- Comprimento: 1.300 mm.
- Comprimento da lança: 1.250 mm.
- Curso do pistão: 290 mm.

Os materiais que serão adquiridos pronto são: rodízios, pistão hidráulico, parafusos, porcas e arruelas. Toda a estrutura da girafa será feita de cantoneiras e chapas de aço carbono ABNT 1020. A lança será feita por meio de estampagem e soldagem. O gancho será feito de um tarugo de aço de médio carbono (ABNT 1045) forjado. Veja a seguir uma tabela com um resumo do que será adquirido.

Tabela 1.13 | Itens a serem adquiridos

Item	Unidade	Quant.	Preço unit (R\$)	Preço total (R\$)
Rodízio	Peça	3	200,00	600,00
Cantoneira (1)	m	4	80,00	320,00
Chapa (2)	m ²	2	130,00	260,00
Tarugo (3)	Peça	1	15,00	15,00
Pistão hidráulico	Peça	1	300,00	300,00
Diversos (4)				100,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Obs: (1) em L, com 4 “ x 6 mm de espessura.

(2) com 3 mm de espessura.

(3) secção quadrada, de 20 mm, com 300 mm de comprimento.

(4) inclui parafusos, porcas e arruelas.

Os processos de fabricação envolvidos são: estampagem, soldagem, forjamento, usinagem, pintura. Deve ser definido o tipo de soldagem, e o melhor para este caso é a solda por eletrodo revestido, que é de boa qualidade e barata. Então, precisamos saber o custo da hora dos profissionais envolvidos: soldador, operador de forja, operador de estampo, fresador e pintor. Também precisamos dos preços dos insumos de solda e pintura. Para nosso caso, vamos usar a tabela 1.14.

Tabela 1.14 | Custos em Processos de Fabricação

Item	Horas	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
Soldagem	4	30,00	120,00
Forjamento	1	40,00	40,00
Usinagem	2	30,00	60,00
Estampagem	1	30,00	30,00
Pintura	1	30,00	30,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Obtendo todos esses custos, podemos chegar ao custo aproximado de nossa girafa. Em nosso caso, temos R\$ 995,00 de insumos (Tabela 1.13) e R\$ 280,00 dos processos de fabricação (Tabela 1.14).

Avançando na prática

Projeto de uma calandra para tubos

Descrição da situação-problema

Você foi contratado para liderar um grupo que fará o projeto de uma calandra a ser usada no curvamento de tubos. Nesse estágio do projeto, você deve estimar

Figura 1.15 | Calandra



Fonte: <https://www.romeuferramentas.com.br/calandra-de-perfil-lrct-1.html>. Acesso em: 12 nov. 2018.

o custo dessa calandra. A primeira coisa é saber como será a calandra. Ela terá três rolos que farão o dobramento do tubo. Veja a imagem a seguir.

Os componentes da calandra são:

- Motor elétrico.
- Rolos.

- Mancais.
- Eixos.
- Estrutura.
- Alavanca e eixo sem-fim.
- Engrenagens.
- Caixa das engrenagens.
- Diversos (botões, ponteiras, parafusos, porcas e arruelas).

Resolução da situação-problema

O motor é o único componente que será comprado pronto, além, é claro, dos itens chamados de “diversos” na lista apresentada. Para nossa aplicação, ele deverá ter uma potência de 1 cv. A estrutura será de ferro fundido, e será fundida em areia verde. O motor será fixado em uma base presa na estrutura. Tal base será de aço carbono galvanizado, com as dimensões de 500 x 400 mm. No alto da estrutura há o fixador da manivela, feito de aço duro (ABNT 1065), usinado a partir de um tarugo quadrado de lado 50 mm com 200 mm de comprimento. Os rolos serão de aço duro (ABNT 1065), com diâmetro de 100 mm, feitos a partir de tarugos de 110 mm. A manivela e o eixo sem fim serão de aço ABNT 1045, usinados a partir de um tarugo de diâmetro 40 mm e comprimento de 1 m.

A caixa de engrenagens será de tiras de aço ABNT 1020 e as engrenagens serão de aço ABNT 1045, usinadas a partir de um tarugo de diâmetro 150 mm e comprimento de 500 mm. Os eixos em que se apoiam essas engrenagens serão de aço ABNT 1045, usinados a partir de um tarugo de diâmetro 40 mm e comprimento 500 mm. Então, vamos ao cálculo dos custos.

Tabela 1.15 | Custo dos componentes/matérias-prima

Item	Tamanho	Custo (R\$)
Motor	—	500,00
Chapa de aço ABNT 1020	800 x 800 mm	150,00
Tarugo quadrado de aço ABNT 1065	50 mm x 200 mm	60,00
Tarugo redondo de aço ABNT 1065	110 mm x 200 mm	120,00
Tarugo redondo de aço ABNT 1045	40 mm x 1500 mm	150,00

Item	Tamanho	Custo (R\$)
Tarugo redondo de aço ABNT 1045	150 mm x 500 mm	700,00
Diversos		100,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Processos de fabricação

Tabela 1.16 | Custo da mão de obra

Item	Quant.	Preço (R\$)
Fundição e acabamento	1	200,00
Torneamento	6 h	240,00
Fresamento	4 h	200,00
Montagem	2 h	80,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Com essas planilhas, podemos ver que nossa calandra sairá pelo valor aproximado de R\$ 2.500,00.

Faça valer a pena

1. Ao desenvolver o projeto de uma máquina, é essencial preparar um cronograma confiável para que as tarefas sejam executadas conforme o planejado. O cronograma deve ser preparado pelos técnicos envolvidos no processo, por conhecerem os detalhes da fabricação.

Sobre um cronograma de projeto, considere as asserções a seguir.

- I. Como um cronograma deve ser confiável, ele não pode ser preparado no início do projeto, pois seus detalhes ainda são desconhecidos.
- II. A etapa de produção não pode ter um final, porque a ideia é que o projeto tenha a vida mais longa possível.
- III. Ao longo do projeto, o cronograma pode sofrer alterações, caso surjam informações mais confiáveis.

Com relação a estas afirmações, assinale a alternativa correta.

- a) Apenas a afirmação I é correta.
- b) Todas as afirmações são incorretas.
- c) Apenas a afirmação II é correta.
- d) Apenas a afirmação III é correta.
- e) Todas as afirmações são corretas.

2. Na sequência de projeto de uma máquina, uma das etapas diz respeito à análise

detalhada das opções de projeto que surgiram na etapa de síntese de informações. Nessa etapa, serão aceitas as opções viáveis, alteradas as opções que precisem de algumas alterações e eliminadas as opções inviáveis. Então, sobre essa etapa, considere as seguintes asserções e a relação entre elas.

I - Essa etapa deverá ser desenvolvida por uma equipe exclusivamente técnica.

PORQUE

II - Existem muitas análises técnicas que devem ser feitas.

Com relação a essas afirmações marque a alternativa correta.

- a) A asserção I é uma proposição falsa e a II, uma proposição verdadeira.
- b) Tanto a asserção I quanto a II são proposições falsas.
- c) As duas asserções são proposições verdadeiras, e a II é uma justificativa correta da I.
- d) As duas asserções são proposições verdadeiras, mas a II não é uma justificativa correta da I.
- e) A asserção I é uma proposição verdadeira e a II, uma proposição falsa.

3. Um fator muito importante em um projeto de máquina é o custo dela. Isso porque um custo muito elevado pode inviabilizar a produção da máquina em questão. Então é preciso que se tenha ferramentas para fazer uma boa estimativa desse custo. Considerando o custo de um projeto, marque V, para verdadeiro, e F, para falso, nas afirmações a seguir.

- () As peças compradas prontas de fornecedores não devem entrar na estimativa de custos do projeto.
- () Os custos fixos da empresa devem ser levados em conta no custo do projeto.
- () A matéria-prima a ser adquirida deve ser levada em conta na quantia exata a ser usada para a confecção da máquina.
- () Os custos da equipe de projeto devem ser levados em conta, mas os demais gastos (como materiais adquiridos), não.

Agora escolha a alternativa que contém a sequência correta.

- a) V - V - F - F.
- b) F - V - F - F.
- c) F - F - V - F.
- d) F - F - V - V.
- e) V - F - V - F.

Referências

BAXTER, M. **Projeto de Produto**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. [Minha Biblioteca].

COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de elementos de máquinas: uma perspectiva de prevenção da falha**. Tradução: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco et al. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

DIAS, S. R. **Pesquisa de Mercado**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2007. [Minha Biblioteca]

CALLISTER JR., W. D., RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. [Minha Biblioteca].

MANTOVANI, A.; et al. **Crane – Girafa Eletro Hidráulica**. São Caetano do Sul: Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2013. Disponível em: <http://www.excute.educatrounica.com.br/Monografias%2037%C2%AA%20EXCUTE/Manuten%C3%A7%C3%A3o%20Automotiva/Crane%20-%20Girafa%20Eletro%20Hidr%C3%A1ulica.pdf>. Acesso em: 25 out. 2018.

MELCONIAN, S. **Elementos de Máquinas**. 10. ed. São Paulo: Érica, 2012. [Minha Biblioteca].

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. [Minha Biblioteca].

Unidade 2

Análise e modelagem básica de uma máquina

Convite ao estudo

Prezado aluno,

Você até pode estar pensando como é difícil projetar um equipamento. Embora o tema seja desafiador e vá exigir muito (são cálculos, projetos e análises que devem ser feitos com a finalidade de que o projeto de máquinas possa ser o mais preciso possível e que não apresente falhas), baseando-se nos conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia Mecânica, você terá plena capacidade para desenvolver e projetar os mais variados tipos de máquinas e equipamentos.

As máquinas fazem parte das nossas vidas. Consegue imaginar um mundo sem um sistema de transporte, sem a produção de alimentos, remédios, vestuários? Encontramos máquinas, equipamentos, dispositivos e sistemas em todos os setores, desde a produção no campo até o filme que você assiste no cinema nos deparamos com uma máquina que realiza uma determinada operação. Para todas essas máquinas, um projeto é necessário.

Nesta unidade, você vai conhecer compreender e ser capaz de efetuar os principais cálculos necessários para elaboração de um projeto de máquinas e entender que o dimensionamento de um equipamento é fundamental para produzi-lo. Conhecer os cálculos aplicados a um projeto de máquinas lhe proporcionará a capacidade para entender sobre as falhas que podem surgir em um equipamento. Verá, também, os conceitos relacionados à análise e modelagem de uma máquina.

Para introduzi-lo nesse contexto de desenvolvimento e poder assimilar as competências propostas nesta unidade, apresentamos o seguinte contexto de aprendizagem:

Você empreendeu e montou uma pequena empresa de fabricação de máquinas, que chamou de Anexo Máquinas, e, como engenheiro mecânico, está diante dos mais variados desafios que podem surgir para produção de qualquer tipo de equipamento. É importante destacar que, na sua empresa, você possui máquinas para usinagem, soldagem, ferramentas manuais etc., sendo assim, você é o responsável pelo desenvolvimento do projeto, pela gestão e pela qualidade da produção no atendimento aos clientes.

Em busca de potencializar os ganhos para a Anexo Máquinas, você começou a participar de processos concorrenciais, tanto na iniciativa pública como na privada, para produção de equipamentos para instituições de ensino, e você foi o vencedor em uma delas, com o menor custo de produção. Será necessário, então, criar um projeto dessas impressoras, realizando os cálculos estruturais necessários para que o equipamento tenha robustez e apresente um design que agrade, sanar todas as deficiências que podem aparecer e, ao final, realizar a prototipagem de algumas peças.

Nesse contexto, algumas questões surgiram: como identificar se uma peça vai ou não suportar a carga imposta em um determinado equipamento? Seria economicamente viável produzir e testar todas as peças fabricadas para a composição de uma máquina ou equipamento? Os cálculos são suficientes para entender se um determinado conjunto vai resistir a tração, o torque, o cisalhamento?

Os conteúdos que iremos abordar nesta unidade de aprendizagem (conceitos de projetos, análises de falhas, fadiga, esforços das cargas estáticas e dinâmicas, da tração e compressão além da modelagem por elementos finitos e prototipagem) darão a base para que você possa realizar um projeto de máquinas que seja eficaz e eficiente para a produção.

Preparado? Então vamos ao nosso estudo!

Análise de falhas e cálculo de esforços

Diálogo aberto

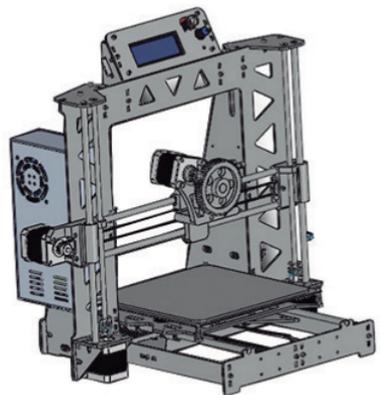
Olá, caro aluno. Seja bem-vindo!

“Nem Deus afunda o Titanic”. Possivelmente, você assistiu ao famoso filme em que um grande navio naufraga, em abril de 1912. Pode até ser que essa frase nunca tenha sido pronunciada por nenhum dos projetistas da época, mas uma coisa é certa: um grande projeto, idealizado pelas mentes dos engenheiros mais brilhantes da época, foi parar no fundo do mar após colidir com um *iceberg*. A intenção aqui não é assustá-lo, mas sim levá-lo a refletir que falhas em projetos podem acontecer, diante disso, você deve estar sempre atento a todos os detalhes, cálculos, análises e experimentação dos projetos que você irá elaborar.

No contexto de aprendizagem desta unidade, você é um empreendedor e possui uma empresa que desenvolve e fabrica máquinas e equipamentos diversos. Pensando no aumento dos ganhos para a Anexo Máquinas, você participou de licitações e, em uma delas, a sua empresa foi vencedora, com a melhor proposta para o desenvolvimento e fabricação de um lote de impressoras 3D que serão utilizadas em instituições de ensino para que os alunos possam, de uma forma didática e prática ao mesmo tempo, conhecer este processo de fabricação.

Dessa forma, a Anexo Máquinas deverá projetar e produzir este lote impressoras didáticas. Na licitação, consta que o equipamento deve ser robusto e suportar as cargas impostas. Os primeiros cálculos que você deve apresentar se referem ao projeto de um eixo para essa impressora 3D, conforme apresenta a Figura 2.1, que deve ser construído em aço SAE 1045. Para isso, é necessário apresentar uma análise de falha por fadiga, composta pelos cálculos do limite de resistência à fadiga (S_e) e da resistência à fadiga (S_f) a 10^3 ciclos. Sabe-se que a vida esperada para esse eixo deve estar alinhada com um

Figura 2.1 | Modelo de impressora 3D



Fonte: elaborada pelo autor.

nível de estresse de 430 MPa, em que o limite de resistência a tração (S_{ut}) é igual a 530 MPa. Assim, responda: qual é o limite de resistência à fadiga (S_e)? Qual é a resistência à fadiga (S_f) a 10^5 ciclos? Qual é a vida adequada a este nível de estresse para o eixo?

Para responder a essas e muitas outras questões, ao longo da unidade serão abordados assuntos referentes à análise de falhas estáticas, dinâmicas e por fadiga, além de cálculo de esforços para cargas estáticas e cargas dinâmicas.

Quer tornar a vida das pessoas mais leve, segura e confortável? Então aprofunde-se nos estudos e mãos à obra.

Bons estudos!

Não pode faltar

Prezado aluno,

Grande parte dos estudos de engenharia de projetos recorre aos cálculos, o que significa estratificar as partes do conjunto e analisá-las primeiramente em separado e, na sequência, realizar uma avaliação do conjunto. Para iniciar um projeto de máquinas, o engenheiro deve saber analisar os mais variados sistemas, como o elétrico, o mecânico, o hidráulico e o de combustão, usando para isso as técnicas fundamentais de matemática e física.

Você já se perguntou por que as peças podem falhar? Os muitos testes e técnicas de medições desenvolvidos ao longo dos tempos tornaram mais visíveis e compreendidos os muitos mecanismos de falha. Um dos motivos da ocorrência de falhas nas peças são as tensões que excedem a resistência oferecida pelas peças. Essas tensões podem ser de tração, compressão ou cisalhamento. As tensões ainda dependem do material que é aplicado e de sua relativa resistência quando submetida à compressão, à tração e ao cisalhamento. Outro fator importante é o tipo de carregamento, que pode ser estático ou dinâmico, além da existência ou não de trincas no material.

Um elemento de máquina pode ter sido projetado numa condição segura de operação, sob condições estáticas, porém ao combinar esforços e aplicar cargas dinâmicas, estas podem ser tanto aplicadas subitamente (carga de impacto) como variadas repetidamente no tempo (carga de fadiga), ou ambas. (NORTON, 2013). A falha por fadiga é um fenômeno proveniente de cargas cíclicas flutuantes ou derivadas de combinações de cargas (NORTON, 2013).

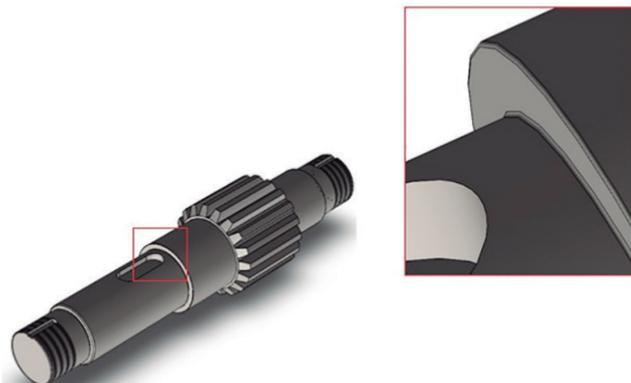
O carregamento em um componente pode produzir tensões normais ou de cisalhamento, de modo que sejam encontradas por equações apropriadas

ou pelo Círculo de Mohr. Vamos discutir os principais tipos de condição de cargas para que seus projetos não entrem em falhas.

O modo de falha deve ser estudado em todos os projetos, a fim de eliminar uma interrupção do funcionamento pela quebra do equipamento, além de gerar confiabilidade e segurança no equipamento. Assim, identificar o modo de falha dará ao projetista a capacidade de minimizar a parada do equipamento e garantir a segurança necessária ao usuário. É importante destacar que a maior parte das falhas que ocorrem nas máquinas são decorrentes de cargas que variam no tempo, sendo assim, elas não são provenientes dos esforços estáticos, portanto manter a confiabilidade e segurança de um equipamento é fundamental.

O modo de falha sob condição dinâmica ou cíclica, denominado fadiga, pode apresentar pequenas trincas, que muitas vezes são imperceptíveis a olho nu. De acordo com Collins (2006), modos de falha são os processos físicos que ocorrem ou que combinam seus efeitos para produzir a falha. Uma trinca desenvolve-se no ponto em que a geometria do elemento de máquina possui alguma alteração em sua superfície, que pode ser uma saliência, um canal, rebaixo e até mesmo um risco provocado pela operação incorreta em uma montagem, isto se dá em função da concentração de tensão localizada. Quando esse componente ou elemento de máquina é colocado em operação sob carga cíclica, essas pequenas trincas aumentam devido à concentração de tensão localizada e em função de um tempo, chegando há um ponto em que a carga é maior que a resistência da área no componente, e, quando isso ocorre, temos a falha. Um exemplo de um eixo que recebe uma carga cíclica pode ser verificado na Figura 2.2. Note que a construção de um pequeno abaulamento ou raio na mudança de geometria da peça faz com que se minimize a atuação da tensão localizada da seção.

Figura 2.2 | Eixo pinhão com engrenagem



Fonte: elaborada pelo autor.

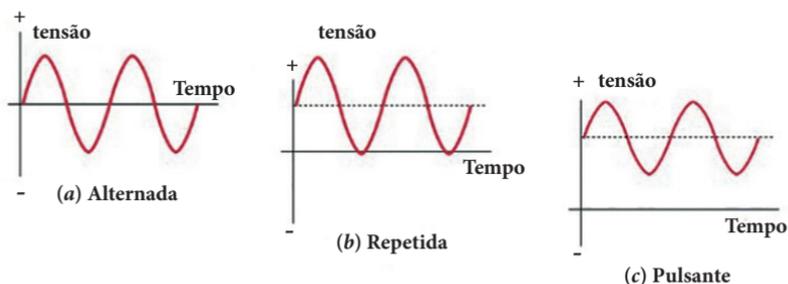
A falha repentina de um elemento de máquina, sem que ocorra um modo de falha, acontece quando o nível de tensão excede o valor crítico para um número especificado de ciclos. Portanto, uma falha por fadiga pode ser diferenciada visualmente de uma falha estática pelo aparecimento de duas regiões na peça com falha. Existem três estágios na falha por fadiga: início da trinca, propagação da trinca e ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca (JUVINALL, 2016). A primeira região é devida ao início da trinca e a segunda região é devida ao aumento considerável dessa trinca, o que é determinado pelo raio de ponta desta trinca, visto na falha estática de um material frágil, como o ferro fundido. Isso está em contraste com o que seria visto na falha estática de um material dúctil, em que a produção considerável seria visível.

Segundo Juvinal (2016), algumas vezes, são utilizados procedimentos experimentais para a obtenção de uma definição estatística das cargas aplicadas. Em outros casos, os engenheiros utilizam os registros de falhas em serviço em conjunto com as análises de resistência para inferir estimativas razoáveis para as cargas atuantes nos componentes em operação. A determinação das cargas apropriadas é, em geral, uma etapa inicial difícil e desafiadora do projeto de uma máquina ou componente estrutural (VIDOSIC,1957).

Alguns materiais, como o aço, têm um valor crítico de tensão, que, se nunca excedido, garante que o elemento da máquina tenha uma vida infinita. Para outros materiais, como o alumínio, não existe tal valor em qualquer número de ciclos, então o elemento da máquina falhará em algum ponto, não importando quão baixo seja o nível de tensão.

Na Figura 2.3, vamos conhecer os tipos de tensões variantes no tempo. Este pode ser o comportamento das tensões atuantes em determinadas peças em função do tempo.

Figura 2.3 | Tipos de tensão atuantes em função do tempo

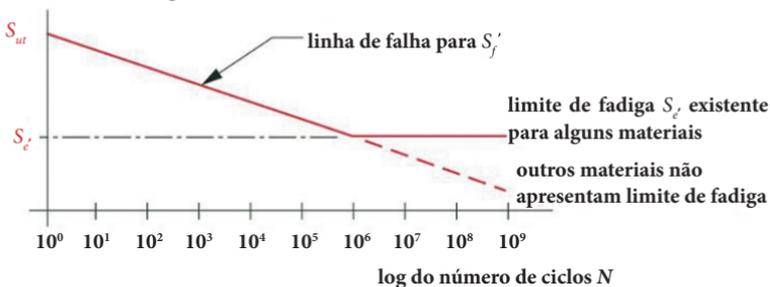


Fonte: adaptada de Norton (2013).

De acordo com Norton (2013), foi desenvolvido pelo engenheiro alemão August Wöhler o diagrama S-N, ou Curva de Wöhler, que tornou-se a forma padrão para caracterizar o comportamento dos materiais submetidos a solicitações alternadas. Apesar de existirem outras formas para determinar a vida útil de um componente específico, o gráfico S-N, conforme demonstrado na Figura 2.4, ainda continua sendo utilizado.

Figura 2.4 | Diagrama S-N ou Curva de Wöhler (resistência à fadiga versus vida esperada)

log da resistência à fadiga S



Fonte: Norton (2013, p. 305).

Para desenvolver um projeto e obter sucesso na predição de sua vida útil, deve-se conhecer os modelos de falhas por fadiga, e, para isso, encontramos três modelos à disposição, cada um deles possui uma área de aplicação específica, e podemos abordá-los da seguinte maneira:

- a) Regime de fadiga: tem base no modelo de tensão-número de ciclos (S-N), ao se utilizar este, deve-se atentar para o número de ciclos de tensão ou de deformação para o componente definindo a fadiga de baixo ciclo (FBC) de até 10^2 ciclos de tensão/ deformação, variando de acordo com o material. Já para a fadiga de alto ciclo (FAC), alguns autores sugerem um valor igual a 10^3 ciclos de tensão/deformação. Sendo assim, pode-se considerar $N = 10^3$ ciclos para diferenciar os dois regimes.
- b) Deformação-número de ciclos: essa abordagem visa esclarecer os danos cumulativos devido às modificações cíclicas na carga ao longo da vida da peça, como sobrecargas, que podem introduzir tensões residuais favoráveis ou desfavoráveis na região de falha. Para Norton (2013), as combinações de cargas de fadiga e temperatura elevada são modeladas com maior segurança nesse caso, porque os efeitos de fluência podem ser incluídos na formulação matemática. Esse método é aplicado com maior frequência em regimes de fadiga de baixo-ciclo e em problemas de vida finita, nos quais as tensões cíclicas são elevadas o suficiente para causarem escoamento local.

- c) Modelo da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE): através da análise da fratura, é determinada a melhor forma de identificação do ponto de tensão; esse método é bastante utilizado para determinar o tempo de vida de um determinado componente, principalmente para regimes de baixo ciclo, em que as tensões cíclicas são conhecidas.

Você acha importante conhecer o limite de resistência de um material?

Bem, para se chegar a esses valores, um número suficiente de materiais ferrosos (aços carbono, aços-liga e ferros forjados) foi testado, usando a máquina de ensaios rotativos. Assim obteve-se a seguinte relação entre a resistência à tração (S_{ut}) e o limite de resistência (S_e), por sua vez, obtidos a partir de um teste de fadiga que pode ser assumido para dar um valor preciso, mesmo que o material não tenha sido testado. Deve-se ainda destacar que o limite de fadiga existe somente na ausência da corrosão.



Exemplificando

Uma falha por fadiga inicia-se por uma pequena trinca geralmente microscópica. Tal trinca acontece em regiões críticas, ou seja, de uma tensão elevada concentrada em um ponto. Eixos podem conter diversos concentradores de tensão geométricos, que, através de ocorrência de deformação plástica cíclica, acarretará trincas e posteriormente a falha por fadiga.

Vamos imaginar um veículo a diesel Ciclo Otto, a uma velocidade de 40 km/h, tendo seu motor a 1500 RPM. Quanto tempo levará para que o virabrequim chegue a 10^6 ciclos? E quanto tempo levará para que este mesmo virabrequim chegue a 10^3 ciclos?

Para formular a resposta, vamos seguir os passos:

1 – Usando sempre o SI (Sistema Internacional), é necessário converter km/h para km por revolução.

$$40 \frac{km}{h} \cdot \frac{1h}{60 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{1500 \text{ rev}} = \frac{1}{2,250} \frac{km}{rev}$$

2 – Multiplicar o km/rev encontrado por 10^6 ciclos para encontrar a distância percorrida.

$$dist \cdot 10^6 = \frac{1}{2,250} \frac{km}{rev} \cdot 10^6 \text{ rev} = 444 \text{ km}$$

3 – Refaça o cálculo para 10^3 .

$$\frac{1}{2,250} \cdot 10^3 = 0,444 \text{ km ou } 444 \text{ metros}$$

4 – Para encontrar o tempo, basta dividir o valor encontrado no passo 2 pela velocidade do veículo.

$$\text{tempo}10^3 = \frac{444\text{km}}{40\text{km/h}} = 11,1\text{horas} = 666\text{s}.$$

5 – Deve-se repetir o procedimento para tempo 10^3 .

$$\text{tempo}10^3 = \frac{0,444\text{km}}{40\text{km/h}} = 0,011\text{horas} = 66\text{s}.$$

Você pode perceber a diferença entre os tempos encontrados para valores de ciclos. Note que, através dos cálculos, é possível identificar a utilização de um determinado componente, e, nesse caso, podemos perceber que o virabrequim atingirá a quantidade de ciclos em apenas 66 segundos. Caso esse componente tenha um concentrador de tensão ou uma micro-trinca, ele se romperá pela fadiga.

Vamos entender um pouco mais de cargas de fadiga?

Como você já viu nos tipos de tensão em função do tempo na Figura 2.3, qualquer carga que possa variar no tempo pode provocar uma falha de fadiga, seja uma carga alternada, repetida ou pulsante. Qualquer um dos tipos de onda citados pode ser caracterizado por meio de dois parâmetros: componentes média e alternada, valores máximo e mínimo ou por meio da razão desses valores.

O intervalo de tensões $\Delta\sigma$ é definido como:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\min} - \sigma_{\max}$$

Para amplitude da variação da tensão, designada como σ_a , conhecida como tensão alternada, na qual o valor médio é zero, utiliza-se:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\min} - \sigma_{\max}}{2}$$

Quando a tensão é média, na qual a forma de onda de zero a um máximo com um valor médio igual à componente alternada, utiliza-se:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Diante disso, podemos definir duas razões:

Razão de tensão definida por R:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Razão de amplitude definida como A:

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

Uma das grandes oportunidades propostas pelo estudo da fadiga dos materiais está em determinar a vida útil de um elemento, seja uma engrenagem, rolamento, eixo, polia, ou até mesmo uma estrutura de máquina. Vamos convencionar da seguinte maneira para efeito dos cálculos, lembrando que, para cada material, o limite de resistência à tração será diferente.

$$S_e = 0,504S_{ut} \text{ para } S_{ut} \leq 1400 \text{MPa}$$

$$S_e = 700 \text{MPa para } S_{ut} > 1400 \text{MPa}$$

Sendo:

S_e = Limite de resistência a fadiga

S_{ut} = Limite de resistência a tração

Todos os materiais apresentam uma variação de resistência. Muitos aços-liga e de baixo carbono, alguns aços inoxidáveis, ferros, ligas de molibdênio, ligas de titânio e alguns polímeros apresentam, de fato, uma certa inflexão. Outros materiais, como o alumínio, magnésio, cobre, ligas de níquel, alguns aços inoxidáveis e aços-liga e de alto carbono exibem curvas S-N que continuam o seu decaimento com o aumento de N, embora a inclinação possa tornar-se menor além de aproximadamente 10^7 ciclos. Para aplicações que requerem um tempo de operação inferior a 10^6 ciclos, pode-se definir uma resistência à fadiga S_f para qualquer N dos dados em questão. O termo limite de fadiga é usado para representar a resistência para uma vida infinita somente para os materiais que apresentam essa grandeza característica.

Assim, neste processo encontra-se uma inflexão (“joelho”) e define-se o limite de fadiga S_e para o material, considerando que o nível de tensão deve ser abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga, podendo-se continuar os ciclos de tensão ilimitadamente.

A equação da linha reta do joelho em ($N = 10^3$) ciclos, em que a força de fadiga (S_f) é ($0,9 \cdot S_{ut}$) ao joelho em ($N = 10^6$) ciclos, em que a força de fadiga (S_f) é (S_e) tem a forma na equação:

$$S_f = aN^b$$

Em que o coeficiente (a) possui unidade de tensão e é dado por:

$$a = \frac{(0,9 \cdot S_{ut})^2}{S_e}$$

E o coeficiente (b) é adimensional e dado por:

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0,9S_{ut}}{S_e}$$

Se a tensão de amplitude (σ_a) é conhecida, então podemos substituir esse valor na equação e descobrir o número de ciclos (N) através de:

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$$

Segundo Collins (2006), fadiga é um termo geral aplicado à separação repentina e catastrófica de um componente de máquina em duas ou mais partes, como resultado da aplicação de cargas ou deformações variáveis por um período de tempo.



Pesquise mais

Quer saber mais sobre o cálculo de fadiga de acordo com o método S-N? Assista ao vídeo do engenheiro José Guilherme sobre fadiga:

ENSUS ENGENHARIA LTDA. **Fadiga** – Aula 05. 7 jun. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TqbTnuFtj30>. Acesso em: 11 dez. 2018.

É importante, ainda, que você calcule todos os componentes utilizados em seu projeto.

Você sabe como executar o cálculo de esforços para cargas estáticas? Bem, vamos entender.

O dimensionamento de máquinas exige do engenheiro a dedicação e o detalhamento de cada componente do projeto. Agora que você já conhece o fenômeno da fadiga e pode determinar a vida útil de uma determinada peça, vamos estudar outras formas de projetos.

As cargas fundamentais nos elementos da máquina são carga axial, carga direta de cisalhamento, torção e flexão. Cada um desses carregamentos produz tensões no elemento da máquina, bem como deformações, o que significa uma mudança na forma. Existem apenas dois tipos de estresse: normal e de cisalhamento. A carga axial produz uma tensão normal, cisalhamento direto e torsão produzem tensões de cisalhamento, e a flexão produz tanto uma tensão normal como uma de cisalhamento.

Relembrar o cálculo da tensão é necessário, essas duas forças produzem uma carga de tração ao longo do eixo da barra, resultando em uma tensão normal de tração (σ), a força (P) e a área da seção (A), dada por:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

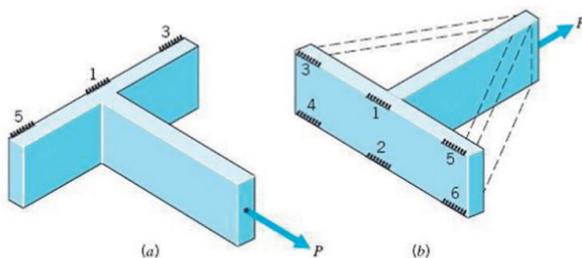


Refleta

Observe na Figura 2.5 (a) um exemplo que pode gerar uma falha inesperada devido à hipótese inadequada de que o cálculo da tensão axial utilizaria simplesmente a relação P/A . Nesse caso, imagine a aplicação de uma carga P de $1 \cdot 10^6$ N e de seis pontos de solda iguais para unir o suporte a uma superfície plana fixa. Pense que a carga *média* atuante em cada solda para este caso é de 100 N. Entretanto, as seis soldas configuram trajetórias de força redundantes em relação a rigidez muito diferentes. Ao observar esta situação, você pode rejeitar a ideia de utilizar *sempre* a relação P/A como um valor aceitável para a tensão máxima a ser relacionada às propriedades de resistência de um material. Mas, você já parou para pensar no porquê?

Refleta sobre a situação apresentada e tire suas conclusões sobre porque ela está sujeita a esta falha inesperada. Aprofunde-se um pouco mais na análise e encontre uma solução plausível para tornar a montagem adequada, respeitando a divisão de carregamento. A figura 2.5 (b) pode te ajudar nesta resposta.

Figura 2.5 - (a) Suporte em forma de T carregado por tração; (b) suporte em forma de T, fixado através de seis pontos de solda



Fonte: Juvinal (2016, p. 80).

A carga em eixos de transmissão de rotação é predominantemente uma de dois tipos: torção devido ao torque transmitido ou flexão devido às cargas transversais em engrenagens, polias e catracas. Essas cargas frequentemente ocorrem em combinação porque, por exemplo, o torque transmitido pode estar associado com forças nos dentes de engrenagens ou de catracas fixadas aos eixos. O caráter de ambas as cargas de torção e flexão pode tanto ser fixo (constante) como variar com o tempo. Cargas torcionais e flexionais fixas ou variáveis, com o tempo, também podem ocorrer em qualquer combinação no mesmo eixo.

Na Figura 2.6, é mostrado um eixo que, na maioria das vezes, sofre torque em sentidos opostos, o que faz com que o eixo esteja sob torção. Esse tipo

de carregamento produz uma tensão, fazendo com que uma extremidade do eixo se torça em torno do eixo em relação à outra extremidade.

Os dois torques opostos (T) produzem uma carga de torção ao longo do eixo, resultando em uma distribuição de tensão de cisalhamento (τ), como dado pela equação:

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad 0 \leq r \leq R$$

Em que (r) é a distância do centro do eixo e (R) é o raio externo. A distribuição dada pela equação é linear, como pode-se observar na Figura 2.7, com a tensão máxima de cisalhamento ocorrendo na superfície do eixo ($r=R$), com tensão de cisalhamento zero no centro do eixo ($r=0$).

Note que a equação é válida apenas para seções transversais circulares. O item (J) na equação é chamado de momento polar de inércia, é utilizado para eixo de seção circular sólida, de raio (R) é dado por:

$$J = \frac{1}{2} \pi R^4$$

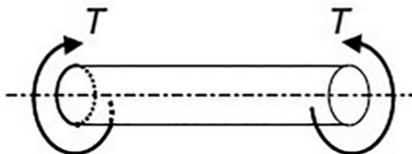
Uma vez determinadas ou estimadas as cargas aplicadas, as equações básicas de equilíbrio permitem que os esforços atuantes em outros pontos de um componente sejam determinados. Para um corpo sem aceleração, essas equações podem ser simplesmente expressas como:

$$\sum F = 0$$

$$\sum M = 0$$

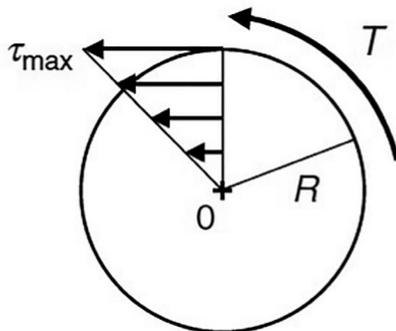
De acordo com Juvinal (2016), essas equações se aplicam relativamente a cada um dos três eixos mutuamente perpendiculares (geralmente representados por X, Y e Z), embora, em muitos problemas, as forças e os momentos estejam presentes em relação a apenas um ou dois desses eixos.

Figura 2.6 | Torsão em eixos



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 2.7 | Tensão de cisalhamento distribuída.



Fonte: elaborada pelo autor.

“Os tipos de solicitações que agem sobre um sistema podem ser divididos em diversas classes baseadas na característica das cargas aplicadas e na presença ou não de movimento no sistema. Uma vez definida a configuração geral de um sistema mecânico e calculados os movimentos cinemáticos, a próxima tarefa é determinar as magnitudes e direções de todas as forças e binários presentes nos seus diversos elementos. Essas solicitações podem ser constantes ou variáveis no tempo. Os elementos no sistema podem ser móveis ou imóveis. A classe de solicitações mais geral é aquela de sistemas que se movem com cargas variáveis no tempo. As outras combinações são subgrupos dessa classe geral. (NORTON, 2013. p.75).

Vamos entender essas classes indicadas por Norton (2013). A Classe 1 consiste em um sistema imóvel com solicitações constantes, tal como a estrutura da base de uma prensa de bancada usada em uma oficina mecânica. A Classe 2 é composta por sistemas imóveis, com solicitações variáveis no tempo, tal qual uma ponte que, embora por sua essência seja imóvel, é submetida a solicitações variáveis quando os automóveis a transpõem ou ainda em função de correntes de vento que se chocam com a sua estrutura. A Classe 3 é composta por sistemas móveis com solicitações constantes, por exemplo, um cortador de grama com lâminas rotativas. Para as Classes 2 e 3, deve ser utilizada a análise dinâmica na determinação das solicitações.

A Classe 4 trata de um sistema móvel suficientemente veloz submetido a solicitações variáveis no tempo. É considerada de Classe 4 grande parte das máquinas, principalmente as que são movidas por motor, como o motor de um carro. Nesse caso, é utilizada a análise dinâmica das solicitações.

Para Norton (2013), três dos quatro tipos de classe requerem uma análise tridimensional do carregamento. Considerando que uma análise estática de forças é, na verdade, um caso particular da análise dinâmica, faz sentido sempre começar as análises pelo dinâmico. Sistemas dinâmicos reais são tridimensionais e, portanto, devem ser analisados como tais.

Desta forma, pode-se realizar a análise dinâmica baseada nas Leis de Newton. Especificamente, a segunda Lei de Newton pode ser escrita para corpos rígidos de duas maneiras:

$$\sum F = m \cdot a$$

$$\sum M_G = H_G$$

Em que F = força, m = massa, a = aceleração e M_G = momento em relação ao centro de gravidade e H_G = Derivada em relação ao tempo da quantidade

de movimento angular, ou do momento da quantidade de movimento em relação ao Centro de Gravidade.

A importância da análise do equilíbrio de um corpo como procedimento para a determinação das cargas sobre ele atuantes deve ser bastante enfatizada. Sugerimos estudar os procedimentos vetoriais para a garantia do equilíbrio.

Em um sistema tridimensional de corpos rígidos conectados, a equação vetorial pode apresentar três equações escalares com os componentes ortogonais e de acordo com os eixos x , y , z e origem no CG do corpo:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= ma_x \\ \sum F_y &= ma_y \\ \sum F_z &= ma_z\end{aligned}$$

Em uma situação em que os eixos x , y , z escolhidos coincidam com os eixos principais de inércia do corpo (corpos simétricos), temos que a quantidade de movimento angular do corpo é definida pela equação:

$$H_G = I_x \omega_x \hat{i} + I_y \omega_y \hat{j} + I_z \omega_z \hat{k}$$

Em que I_x , I_y e I_z são os momentos principais centrais de inércia.

Veja que, quando substituimos esta equação vetorial em $\sum M_G = H_G$, são geradas as três equações escalares conhecidas como equações de Euler:

$$\begin{aligned}\sum M_x &= I_x \alpha_x - (I_y - I_z) \omega_y \omega_z \\ \sum M_y &= I_y \alpha_y - (I_z - I_x) \omega_z \omega_x \\ \sum M_z &= I_z \alpha_z - (I_x - I_y) \omega_x \omega_y\end{aligned}$$

Em que M_x , M_y e M_z são momentos em relação aos eixos; α_x , α_y , α_z são as componentes da aceleração angular. Desta forma entende-se que a disposição de massa nos eixos é constante (NORTON, 2013).



Assimile

Você já observou que todas as máquinas são tridimensionais. Sendo assim, quando usamos as análises bidimensionais? Bem, muitos dos sistemas tridimensionais são analisados na forma bidimensional. Isso ocorre quando os seus movimentos acontecerem em apenas um plano ou no caso de planos paralelos. Neste caso temos:

$$\begin{aligned}\sum M_z &= I_z \cdot \alpha_z \\ \sum F_x &= m \cdot a_x \\ \sum T_y &= m \cdot a_y\end{aligned}$$

Durante este momento de aprendizagem, você pôde verificar a importância das análises de falhas estática, dinâmica e por fadiga, e dos cálculos de esforço para cargas estáticas e dinâmicas para um projeto de máquinas. Não deixe de se aprofundar nesses estudos para se tornar capaz de aplicá-los de forma completa e assertiva quando realizar o seu projeto.

Sem medo de errar

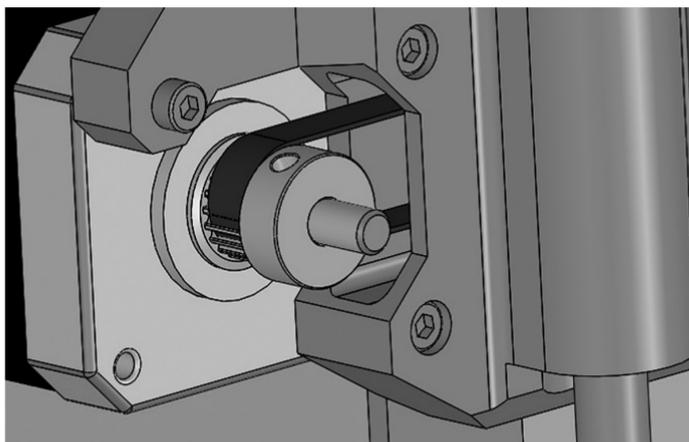
Você, como diretor e gestor de uma empresa que desenvolve e produz máquinas e equipamentos, participou de uma licitação para produção de um lote de impressoras 3D que serão utilizadas em instituição de ensino e foi o vencedor.

É importante destacar primeiramente que, em uma licitação, o vencedor é aquele que se propõe a entregar o equipamento com o melhor preço de mercado. Mas devemos também mencionar que uma máquina ou equipamento deve atender aos requisitos de qualidade e segurança que lhe forem impostos. Diante disso, seu projeto deve atender não somente a esses dois pontos, mas também ser um equipamento robusto que cumpra uma vida útil, que desempenhe suas funcionalidades propostas.

Vamos trabalhar de acordo com as especificações indicadas para o produto.

Nessa impressora, todos os eixos são maciços, porém, há oportunidades para o desenvolvimento de novos modelos de componentes.

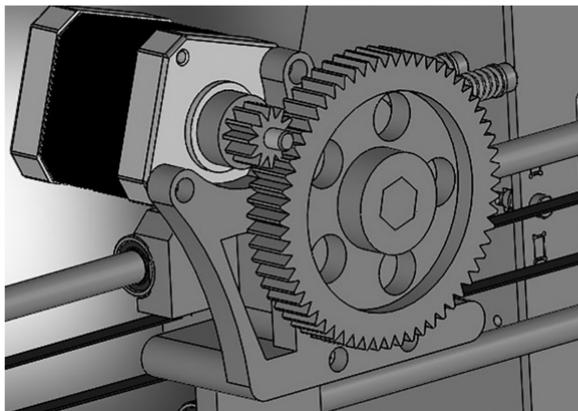
Figura 2.8 | Detalhamento de projeto do sistema de tração do eixo transversal, composto por motores, correias, polias e o eixo do motor de acionamento.



Fonte: elaborada pelo autor.

Há muitas oportunidades para realizar os cálculos em um projeto de máquina, isso significa que você deve trabalhar e estudar muito!

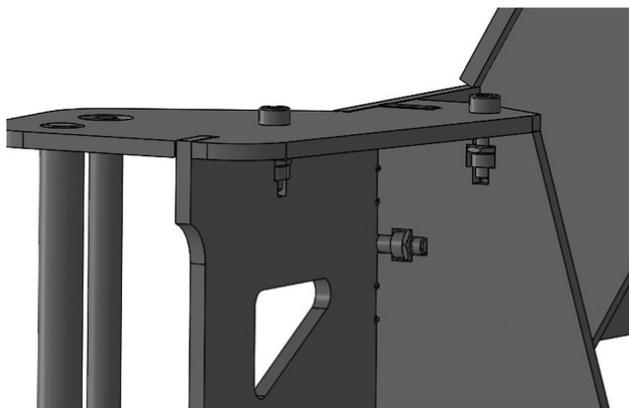
Figura 2.9 | Detalhamento do conjunto de alimentação de matéria prima.



Fonte: elaborada pelo autor.

Note que há muitas opções para desenvolver os cálculos para esse projeto, não será necessário você desenhar o equipamento, mas efetuar os cálculos de dimensionamento dos componentes e conjuntos desta máquina.

Figura 2.10 | Sistema de fixação da estrutura (chassi) da máquina.



Fonte: elaborada pelo autor.

Assim, nessa etapa, é possível concluir que as os cálculos dos eixos e sistemas de fixação apresentam necessidade de dimensionamento. Essas evidências deixam claro que mais pesquisas e informações deverão ser investigadas para a construção de um equipamento com qualidade e custo acessível.

Vamos aos cálculos e respostas às perguntas de nossa situação-problema. Qual é o limite de resistência a fadiga (S_e)? Qual é a resistência à fadiga (S_f) a 10^5 ciclos? Qual é a vida adequada a esse nível de estresse para o eixo?

Usando as equações apresentadas, em que a resistência à tração final (S_{ut}) é inferior a 1400 MPa, o limite de resistência do feixe rotativo (S_e) é:

$$S_e = 0,504 \cdot S_{ut} = 0,504 \cdot 530 \text{ MPa} = 267,1 \text{ MPa}.$$

Agora vamos efetuar o cálculo do coeficiente (a):

$$a = \frac{(0,9 \cdot S_{ut})^2}{S_e} = \frac{(0,9 \cdot 530)^2}{267,1} = 0,85 \text{ MPa}.$$

Agora o cálculo do coeficiente (b):

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0,9 \cdot S_{ut}}{S_e} = -\frac{1}{3} \log \frac{0,9 \cdot 530}{267,1} = -0,084$$

Calculo da força de fadiga (S_f):

$$S_f = a \cdot N^b = 0,85 \cdot 10^{5 \cdot -0,084} = 323 \text{ MPa}.$$

Com isso, temos que:

$$S_e \leq S_f$$

$$267,1 \text{ MPa} \leq 323 \text{ MPa}.$$

Usando a equação para cálculo de vida para a amplitude da tensão, temos que:

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a} \right)^{\frac{1}{b}} = \left(\frac{430}{0,85} \right)^{-\frac{1}{-0,084}} = 3,3225 \text{ ciclos}.$$

Assim, a vida do eixo será 3,3225 ciclos considerando o nível de estresse de 430 MPa.

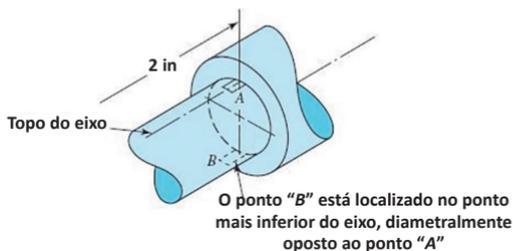
Avançando na prática

Um caso de tensões combinadas

Descrição da situação-problema

Você precisa analisar um eixo referente a uma certa máquina, cujo ponto B é onde atuam as maiores tensões no eixo e está posicionado exatamente do lado oposto do ponto A, de forma simétrica. A seção transversal menor possui um diâmetro de 1 in (25,4 mm). Sabe-se que o ponto B está na posição do eixo onde atuam as maiores tensões.

Figura 2.11 | Indicação do ponto B onde atuam as maiores tensões



Fonte: Juvinall (2016, p. 93).

Algumas hipóteses são fornecidas:

1. A concentração de tensões no eixo escalonado de 1 in (25,4 mm) de diâmetro pode ser ignorada.

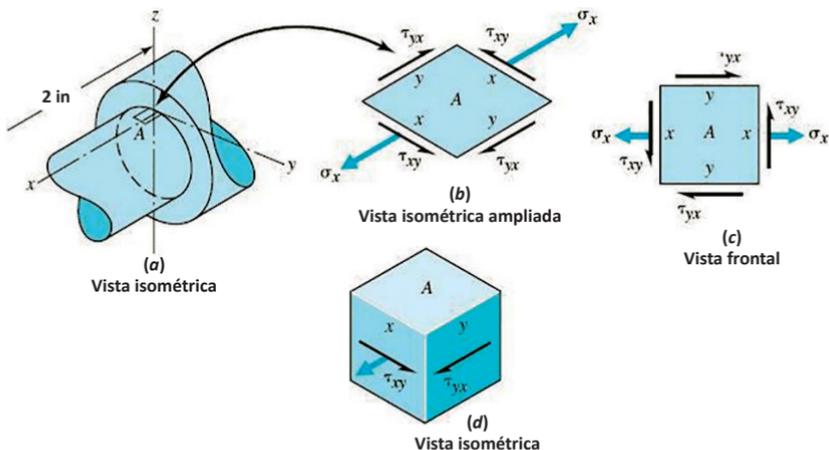
2. O efeito da tensão compressiva atuante na superfície do eixo, causada pela pressão atmosférica, pode ser desprezado

Neste momento, para dar andamento a análise, é necessário que você apresente uma representação da vista isométrica ampliada, a vista frontal e a vista isométrica geral do ponto A à equipe de projeto. Será necessário também que você explique ao time de projeto o significado dessa representação.

Resolução da situação-problema

A representação a ser feita e apresentada ao time deve ser da seguinte forma:

Figura 2.12 | Vistas do elemento A.



Fonte: Juvinall (2016, p. 94).

Na explicação, você deve mostrar que a figura apresenta as tensões atuantes no elemento no ponto *A*. Observar que as tensões que ocorrem no ponto *B* são exatamente iguais, com exceção da tensão de flexão que é compressiva. As duas tensões cisalhantes geram um momento no sentido anti-horário. Isso é consequência direta do sentido da torção no eixo. Desta forma, o sentido horário do momento gerado pelas tensões cisalhantes no outro par de faces do elemento é em função da condição de equilíbrio.

A vista frontal é a forma convencional de se mostrar o elemento sob a ação das tensões. A figura tridimensional representa como as tensões na verdade atuam sobre os *planos perpendiculares à superfície*. A superfície do eixo, não está carregada, exceto pela pressão atmosférica, que é ignorada.

Faça valer a pena

1. A análise da tensão em eixos, vigas e bases de máquinas é fundamental para que seu projeto não entre em falha e desempenhe com sucesso a missão para a qual foi projetado. A estrutura de um equipamento deve ser resistente o suficiente para suportar os elementos de máquinas que compõem o conjunto.

Determine a tensão normal em uma barra quadrada com o lado (*a*) carregado em tensão com forças (*P*), em que:

$$P = 55 \text{ kN} = 55.000 \text{ N}$$

$$a = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m}$$

Assinale abaixo a alternativa que contempla a resposta correta:

- a) 1100 Pa.
- b) 11 MPa.
- c) 2,2 Pa
- d) 0,1375 Pa
- e) 22MPa.

2. São elementos de máquinas utilizados para suportar componentes rotativos. Podemos encontrar esses elementos de máquinas dispostos em dois formatos: os maciços e ocos. Os eixos ocos tem maior resistência quando comparado com um eixo de seção maciça, porém, há muitos casos em que não é possível esta concepção, por diversos motivos.

Determine a tensão de cisalhamento (τ) na superfície interna de um eixo circular oco, em que:

$$T = 12,000 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$D_e = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m} = 2R_e$$

$$D_i = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m} = 2R_i$$

Assinale abaixo a alternativa correta:

- a) 36,2 MPa.
- b) 32,6 MPa.
- c) 2,36 MPa.
- d) 63,20 MPa.
- e) 62,36 MPa.

3. Suponha que o material é um metal dúctil e, sendo manufaturado, não apresenta trincas, mas possui partículas, inclusões, etc., que são comuns em materiais de engenharia. Em uma escala microscópica, os metais não são homogêneos e isotrópicos. Suponha, em seguida, que existam algumas regiões de concentração geométrica de tensão (entalhes) em locais com tensões variantes no tempo significativas, que contenham uma componente positiva (tração).

Analise as afirmativas abaixo, assinalando com um “V” quando verdadeiras e um “F” quando falsas:

- () Conforme as tensões no entalhe oscilam, pode acontecer escoamento local devido à concentração de tensão.
- () A deformação plástica localizada causa distorções e cria bandas de deslizamento (regiões de intensa deformação devido a movimentos cisalhantes) ao longo dos contornos dos cristais do material.
- () À medida que os ciclos de tensão ocorrem, bandas de deslizamento adicionais desaparecem e desagrupam-se, eliminando as trincas microscópicas, o que faz com que o material seja encruado, resistindo a uma maior tensão.

Assinale abaixo a alternativa que apresenta a sequência correta de verdadeiro ou falso, de cima para baixo:

- a) V-V-V.
- b) F-F-F.
- c) V-F-V.
- d) V-V-F.
- e) F-F-V

Análise dimensional e estrutural

Diálogo aberto

Prezado aluno,

Desenvolver um projeto de máquina é muito gratificante para o engenheiro, pois, com criatividade, é possível criar, melhorar e desenvolver técnicas e processos para o bem comum da sociedade. Para poder contribuir de maneira eficiente e construir algo, ou até mesmo fazer a melhoria de um processo, você deve, entre outras coisas, focar sua atenção no projeto a ser desenvolvido.

Vamos lembrar que você empreendeu e montou uma pequena empresa de fabricação de máquinas que chamou de Anexo Máquinas, e, como engenheiro mecânico, está diante dos mais variados desafios que podem surgir para produção de qualquer tipo de equipamento. Você é o responsável pelo desenvolvimento do projeto e pela gestão da qualidade da produção. A empresa venceu uma licitação para produção de impressoras 3D para instituições de ensino e está trabalhando nesse projeto. Nesta fase do projeto, você deve apresentar o cálculo do diâmetro mínimo para um dos parafusos que suportam as estruturas dessa máquina.

Considere que esse parafuso está carregado por uma tensão (σ) após a fixação no conjunto, de modo que não pode exceder uma tensão normal máxima, nem oferecer deformação nos entalhes de fixação. Dados: $F = 60$ KN; $\sigma = 0,3$ MPa. Diante desses dados, o desafio para você será o de realizar o dimensionamento e seleção deste parafuso.

Para que você possa ter embasamento e realizar a problematização proposta, nesta seção serão abordados os efeitos de esforços de tração, compressão, torção e combinados, assim como o dimensionamento e seleção de componentes e de atuadores.

Preparado para mais esse desafio? Então, mãos à obra!

Não pode faltar

Você já deve ter notado que os equipamentos não funcionam com apenas e exclusivamente uma única peça. Na verdade um equipamento é composto por diversos componentes, cada um realizando uma determinada atividade para a qual foi projetado.

As cargas fundamentais nos componentes de um equipamento são a carga axial, o cisalhamento, a torção e a flexão. Cada uma dessas cargas

produz tensões na máquina de maneira a provocar uma deformação, e isso quer dizer que uma mudança na estrutura do equipamento pode ocorrer.

“ Todos os corpos reais deformam sob carga, elástica ou plasticamente. Um corpo pode ser suficientemente insensível à deformação que a presunção de rigidez não afeta a análise o suficiente para justificar um tratamento de corpo não rígido. Se provar-se posteriormente que a deformação do corpo não é desprezível, então declarar rigidez foi uma decisão inadequada, e não uma hipótese inadequada. Uma corda de fio trançado é flexível, porém, sob tração ela pode ser robustamente rígida e distorcer enormemente sob tentativas de carregamento de compressão. O mesmo corpo pode ser tanto rígido como não rígido. (BUDYNAS; NISBETT, 2016, p. 161).

Diante de tantas possibilidades, vamos entender um pouco sobre a tração, a compressão e torção. O prolongamento ou encolhimento total de uma barra uniforme que esteja em condição de tração pura ou compressão pura, é, respectivamente, dado por:

$$\delta = \frac{Fl}{AE}$$

Não podemos aplicar essa equação para uma barra longa carregada em compressão se existir a possibilidade de flambagem. Nesse caso, como trabalhar?

Nesse momento, é importante que você se lembre que o conceito de uma **mola linear**, que é a designação de uma viga bi-apoiada e carregada por uma força transversal, e cuja deflexão seja

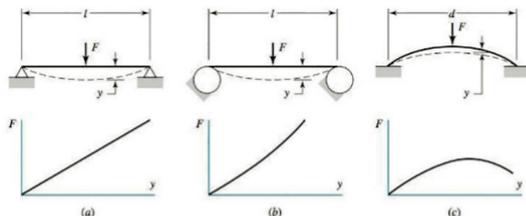
linear à força, desde que o limite elástico do material não seja excedido.



Assimile

Como falamos, a maioria dos problemas de força-deflexão apresentados nos projetos são lineares. Na Figura 2.13, são apresentadas três possibilidades para mola.

Figura 2.13 | (a) Uma mola linear; (b) uma mola de enrijecimento; (c) uma mola de amolecimento



Fonte: Budynas e Nisbett (2016, p. 162).

De acordo com Budynas e Nisbett (2016), uma mola é um elemento mecânico que exerce uma força ao ser deformada.

A Figura 2.13 (a) apresenta uma viga reta (mola linear) com comprimento l , apoiada pelas extremidades e carregada por uma força transversal F . Deflexão y e força estão relacionadas linearmente se o limite elástico do material não for excedido, conforme mostra o gráfico.

Na Figura 2.13 (b), existe uma viga reta apoiada em dois cilindros, de forma que o comprimento entre os apoios diminui quando a viga é fletida pela força F . Desta forma, é necessária uma força maior caso se deseje fletir uma viga curta em vez de uma longa e, assim, quanto mais essa viga for fletida, mais rígida ela se tornará.

A Figura 2.13 © apresenta uma vista lateral de um disco de forma convexa. Para tornar o disco plano, é preciso aumentar a força no início e depois diminuí-la conforme o disco se aproxima da configuração plana.

Devemos lembrar também que, para as situações de força-deflexão linear, trabalhamos com $k = \frac{F}{Y}$ (em libras por polegada ou newtons por metro), em que k é a razão de mola, F é a força e y é a deflexão. Assim, se usarmos essas duas equações, considerando que $\delta = y$, chegamos à constante de mola de uma barra carregada axialmente, que é:

$$k = \frac{AE}{l}, \text{ em que } E = \text{Módulo de elasticidade e } l = \text{comprimento da viga.}$$

Para calcularmos a deflexão angular em barra redonda uniforme, cuja seção pode ser cheia ou vazada, e que esteja sujeita a um momento de torção T , temos:

$$\theta = \frac{Tl}{GJ} \quad (\theta \text{ em radianos}).$$

Multiplicando por $\frac{180}{\pi}$ e substituindo $J = \frac{\pi d^4}{32}$ para uma barra redonda maciça, temos $\theta = \frac{583,6Tl}{Gd^4}$.

O problema de flexão de vigas provavelmente ocorre com mais frequência que qualquer outro problema de carregamento em um projeto mecânico. Eixos fixos ou rotativos, virabrequins, alavancas, molas, cantoneiras e rodas, bem como muitos outros elementos de máquina, muitas vezes devem ser tratados como se fossem vigas no projeto e na análise de estruturas de sistemas mecânicos (BUDYNAS; NISBETT, 2016).



Exemplificando

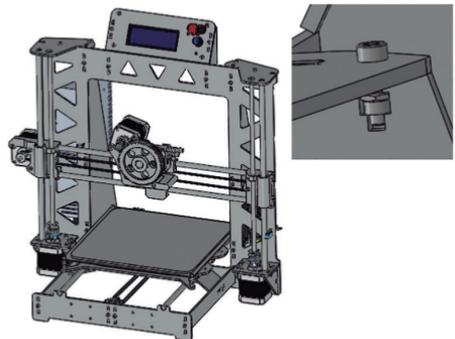
Veja a seguir alguns exemplos de situações de projeto em que uma análise de deflexões é necessária.

- O primeiro é um anel de retenção ou de pressão, que deve apresentar flexibilidade para que ocorra uma flexão sem que ocorra uma deformação permanente e ainda consiga ser montado com as demais peças do conjunto, além de ser firme o bastante para que as peças montadas permaneçam juntas.
- Outro caso é o de uma transmissão, cujas engrenagens são suportadas por um eixo rígido. Caso esse eixo apresente flexão em excesso, ou seja, se ele for muito flexível, não ocorrerá o engrenamento dos dentes das engrenagens de forma correta, gerando grande impacto e desgaste, além de ruído e falha prematura.
- Por outro lado, alguns elementos mecânicos, tais como uma suspensão de um automóvel, deve apresentar em seus projetos uma certa característica de força-deflexão. Esse sistema deve ser projetado com um pequeno intervalo para poder atingir uma frequência ótima de vibração, considerando as condições de carregamento do veículo, já que o corpo humano se sente confortável somente em um intervalo restrito de frequências.

A impressora 3D a ser produzida possui diversos sistemas de fixação, ou seja, parafusos, que são elementos de máquinas. Esses elementos de fixação não permanentemente estão sujeitos a vários tipos de cargas. A primeira delas é a torção, pois, para realizar a fixação, eles recebem um torque de aperto e, posteriormente, são tracionados pelo efeito do torque, recebendo uma tração e assim sucessivamente.

A Figura 2.14 mostra o detalhe de um parafuso de fixação da estrutura do chassi da máquina. Observe que esse parafuso é tracionado no sentido de tração, mas a peça que está sendo fixada recebe uma carga de compressão.

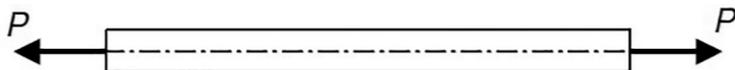
Figura 2.14 | Carga de tração e compressão no parafuso e chapa



Fonte: elaborada pelo autor.

A montagem do parafuso na estrutura da máquina provoca um cisalhamento direto, o que significa que uma tensão de cisalhamento é produzida na chapa. À medida que a força aumenta, pode fazer com que o material ao redor do parafuso possa sofrer alteração da sua forma.

Figura 2.15 | Carregamento axial



Fonte: elaborada pelo autor.

No caso da barra ilustrada pela Figura 2.15, a influência da força será difusa e se distribuirá ao longo da seção transversal da barra. Esse processo constitui a ideia básica por trás das tensões em componentes mecânicos. A tensão é essencialmente uma força interna distribuída sobre a área da seção transversal da barra e é definida por:

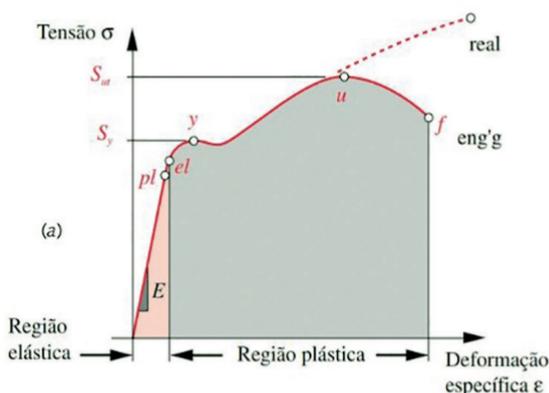
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Assim como a força F , a tensão σ assume a direção perpendicular, e quando a tensão tende a alongar ao material, ela é denominada como tração, neste caso $\sigma > 0$. Por outro lado, se a barra sofrer encurtamento, a tensão é determinada como compressão. Neste caso, a direção de σ reverte-se para o interior da barra e $\sigma < 0$. A tensão é interpretada como uma força distribuída em uma área, portanto, a tensão e a pressão possuem as mesmas dimensões.

Vamos, agora, entender um pouco sobre a tensão-deformação. Enquanto a tensão relaciona-se com a intensidade da aplicação de uma força, a quantidade

denominada deformação, que é utilizada na engenharia, mede o valor do alongamento de um determinado material. Para entender melhor o conceito de tensão-deformação, vamos analisar o gráfico representado na Figura 2.16

Figura 2.16 | Gráfico tensão deformação



Fonte: Norton (2013, p. 32).

Observe que os parâmetros medidos são força e deslocamento, mas os representados no diagrama são tensão e deformação específica. A tensão (σ) é definida como força por unidade de área, a quantidade denominada deformação é definida como o valor de alongamento que ocorre por unidade do comprimento original do material (NORTON, 2013).



Refleta

Os métodos estáticos consistem em solicitar mecanicamente um material por meio de aplicação de uma força. A tensão provocada é ocasionada pela aplicação de cargas de tração, compressão, flexão ou torção, que podem ocorrer em baixas ou altas velocidade, em máquinas e equipamentos, por exemplo, pontos de fixação por parafuso ou rebite, ou, ainda, uma viga suportando uma determinada carga.

Como deve ser o comportamento de uma peça, tal como um eixo que suporta uma engrenagem, quando estiver disposta ou exposta a algum tipo de carga? Ela pode se romper? Em que condição? É melhor um material frágil ou dúctil para suportar as cargas existentes?

A deformação ϵ é calculada a partir da expressão $\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$.

Vamos falar sobre o módulo de elasticidade.

Esse diagrama tensão-deformação de tração nos fornece vários parâmetros úteis do material. O ponto pl na Figura 2.16 é o limite de proporcionalidade abaixo do qual a tensão é proporcional à deformação, conforme expressa a lei de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

O comportamento elástico de um material varia em função da estrutura ser dúctil ou frágil, ou seja, um material dúctil se comporta com um alongamento maior que um material frágil, sendo que este último, ao ser requisitado em tração, não oferecerá aviso de rompimento, sendo praticamente instantânea a tração, em que E define a inclinação da curva tensão-deformação até o limite de proporcionalidade e é chamada de módulo de Young ou módulo de elasticidade do material. É uma medida da rigidez do material em sua região elástica e tem as mesmas unidades da tensão. A maioria dos metais exibe esse comportamento linear e também tem módulos de elasticidade que variam muito pouco com tratamentos térmicos ou com a adição de elementos de liga (NORTON, 2013).

O módulo de elasticidade de um material está relacionado com a resistência das suas ligações interatômicas, por exemplo, as ligas de aço que

possuem elementos de ligas estão em torno de $E_{aço} = 210GPa$, já o alumínio apresenta $E_{alumínio} = 70GPa$. Pode-se notar, então, que o módulo de elasticidade do alumínio é menor que o módulo de elasticidade do aço.

Coefficiente de Poisson (ν)

É a determinação da propriedade do material que quantifica a contração ou a expansão de uma seção transversal, ou seja, quando uma barra é axialmente alongada pela colocação de uma carga, a área da seção transversal do material deve diminuir.

$$\nu = \frac{Def_{transversal}}{Def_{longitudinal}}$$

A razão entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal na direção do esforço de tração chama-se coeficiente (ou razão) de Poisson.



Pesquise mais

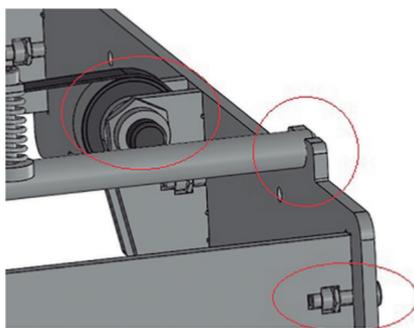
Em praticamente todos os materiais comuns, sua seção se estreita quando são distendidos. A razão para isso é que a maior parte dos materiais resiste mais a uma mudança de volume (determinada pelo seu módulo de compressibilidade) do que a uma mudança de forma. Para auxiliá-lo no entendimento, assista ao vídeo indicado:

AULÃO RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS. Aula 5 – Resistencia dos Materiais – Coeficiente de Poisson. 11 jul. 2015. Disponível no link: <https://www.youtube.com/watch?v=Q0KrC6a4oy0>. Acesso em: 14 jan. 2019.

Vamos estudar um pouco sobre o cisalhamento?

Na Figura 2.17, a tensão de tração σ atua ao longo do comprimento do eixo e do parafuso, e é também forçada em sentido contrário. De modo geral, a tensão de tração irá alongar o componente mecânico, podendo separá-lo em duas partes. A tensão de cisalhamento pode ser observada em diversos pontos de um conjunto de máquinas. O cisalhamento tende a cortar

Figura 2.17 | Ilustração de pontos de cisalhamento do material



Fonte: elaborada pelo autor.

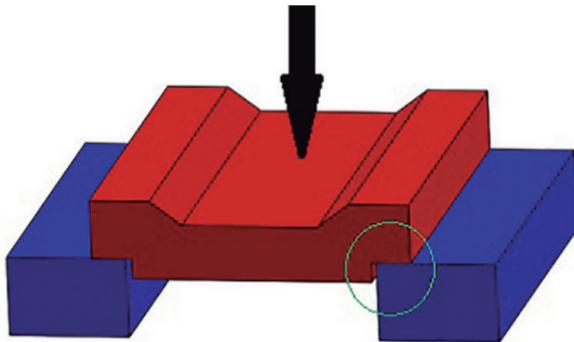
o material através de uma força exercida em determinado ponto, conforme pode ser observado na Figura 2.17. Note um parafuso que suporta uma polia, que, por sua vez, realiza o giro devido à movimentação da correia. A tração da correia proporciona uma tensão na polia, que faz com que o parafuso sofra uma força. Ao exceder o limite do material, certamente o parafuso será separado.

O cisalhamento é diferente da tração e da compressão no sentido de que a tensão é orientada no mesmo plano que a seção transversal da barra, ou seja, a tensão de cisalhamento está associada à força que atua paralelamente à superfície da seção transversal.

Assim como ocorre com a tração e a compressão, as tensões de cisalhamento também são continuamente distribuídas ao longo de qualquer seção transversal do material que possamos fazer. A força V resulta da combinação das tensões de cisalhamento que atuam sobre uma determinada área. Temos, então, que a tensão de cisalhamento τ é definida da seguinte maneira em função da área A e da força de cisalhamento interna resultante V :

$$\tau = \frac{V}{A}$$

Figura 2.18 | Identificação de cisalhamento.



Fonte: elaborada pelo autor.

Precisamos falar, agora, sobre o dimensionamento e seleção de componentes.

No projeto de um componente de máquina ou de uma estrutura, existe a necessidade de determinarmos as dimensões necessárias para que o componente possa suportar as solicitações.

O conhecimento dos materiais e de suas propriedades é de grande importância para um engenheiro de projetos. Os elementos da máquina devem ser feitos de materiais que tenham as propriedades adequadas para as condições de operação. Vale a pena relembrar os materiais!

Os materiais de engenharia são classificados principalmente como:

1. Metais e suas ligas, como ferro, aço, cobre, alumínio, etc.
2. Não metais, como vidro, borracha, plástico, etc.

É muito importante, também, lembrarmos que, em um projeto de máquina, devemos trabalhar com alguns passos fundamentais. Um desses passos apresenta aspectos importantes a serem considerados em cada parte do projeto, incluindo a determinação da geometria inicial, a análise de forças, a identificação dos modos potenciais de falha, a seleção de materiais, a seleção das potenciais seções críticas e pontos críticos, a seleção do fator de segurança e o uso da tensão apropriada e da análise da deflexão.

De acordo com Colins (2006), as seções críticas em um elemento de máquina são aquelas seções transversais que, em função da geometria do componente e da magnitude e orientação de forças e momentos sobre ela, podem conter pontos críticos. Um ponto crítico é um ponto dentro do componente que apresenta um alto potencial para falha devido a elevadas tensões ou deformações, baixa resistência ou uma combinação crítica desses fatores. Normalmente, um projetista primeiro identifica as seções potencialmente críticas para, então, identificar os possíveis pontos críticos dentro de cada seção crítica. Finalmente, cálculos apropriados são realizados para determinar os pontos críticos dominantes, de tal forma que as dimensões calculadas garantam uma operação segura do componente durante a vida útil projetada.



Pesquise mais

Veja um exemplo de seleção de ponto crítico em um projeto de componente acessando a seção 6.3, intitulada *Seções críticas e Pontos Críticos*, do livro:

COLLINS, J. A.; BUSBY, H. R.; STAAB, G. H. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas**. [S.l.]: LTC, 2006. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1935-2/cfi/278!4/4@0.00:22.8>. Acesso em: 21 dez. 2018.

Vamos entender um pouco sobre o dimensionamento e seleção de atuadores.

Um projeto deve atender aos requisitos pelos quais foi pensado, desta forma, uma máquina, um equipamento ou uma ferramenta pode ser constituído por apenas um componente ou por vários elementos, fazendo assim

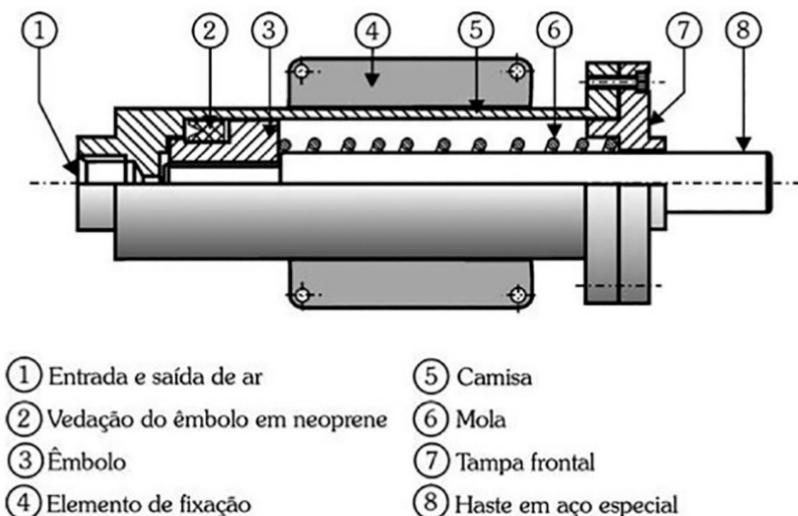
um conjunto de elementos de máquinas, entre os quais podemos encontrar parafusos, engrenagens, polias, correntes, cardans, eixos atuadores pneumáticos e hidráulicos, entre outros tantos.

No dimensionamento de um componente, o engenheiro precisa primeiro entender quais serão as suas solicitações e, como já vimos anteriormente, há a necessidade de pensar em todas as solicitações mecânicas, além de outras, a que o dispositivo estará sujeito.

Dentre tantos componentes a serem dimensionados, o dimensionamento dos atuadores lineares e rotativos para especificação final em catálogos comerciais de fabricantes e revendedores é feito a partir de uma análise dos esforços envolvidos, amplitude de deslocamentos e tipos de montagem.

Os atuadores pneumáticos (Figura 2.19) são elementos mecânicos que, por meio de movimentos lineares ou rotativos, transformam em energia pneumática a energia cinética gerada pelo ar pressurizado e em expansão, produzindo trabalho (FIALHO, 2011).

Figura 2.19 | Atuador pneumático linear de simples efeito com retorno por mola



Fonte: Fialho (2011, p. 78).

De acordo com Fialho (2011), para dimensionar um atuador é necessário identificar as cargas as quais o dispositivo está sujeito. O diâmetro D_p é determinado em função da força de avanço F_a , que é a força de projeto F_p , e da pressão de trabalho P_t . Esse diâmetro refere-se ao diâmetro interno do cilindro que é obtido da equação da área do pistão, para o caso de força

aplicada durante a fase de avanço. Se, no entanto, a força for aplicada durante a fase de retorno do atuador, a variável Ap na equação deve ser mudada pela variável Ac (área da coroa).

$$Dp = 2 \cdot \sqrt{\frac{Ap}{\pi}} ; \text{relembrando a equação da pressão: } Dp = 2 \cdot \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot p}}$$

Temos, então, que $Dp = 2 \cdot \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot P}}$; Lembrando que $F = Fp \cdot \varphi$

Em que φ é um valor a ser utilizado conforme tabela abaixo:

Tabela 2.1 | Fator de correção de força.

Velocidade de deslocamento da haste do atuador	Exemplo	Fator de correção φ
Lenta e carga aplicada somente no fim do curso	Operação de rebitagem	1,25
Lenta e carga aplicada em todo o desenvolvimento do curso	Talha pneumática	1,35
Rápida com carga aplicada somente no fim do curso	Operação de estampagem	1,35
Rápida com carga aplicada em todo o desenvolvimento do curso	Deslocamento de mesas	1,50
Situações gerais não descritas anteriormente		1,25

Fonte: Fialho (2011, p. 98).

Então:

$$Dp = 2 \cdot \sqrt{\frac{Fp \cdot \varphi}{\pi \cdot Pt}}$$

Em que:

Dp = Mínimo diâmetro aceitável do pistão [cm];

Fp = Força de projeto, força necessária para execução da operação [kp];

φ = Fator de correção da força de projeto, Tabela 2.1;

Pt = Pressão de trabalho $[kp/cm^2]$ [kp/cm²].

Calculado o diâmetro do pistão e conhecidas as demais necessidades quanto ao tipo de fixação, curso etc., pode-se procurar nos catálogos dos fabricantes um atuador pneumático que tenha diâmetro no mínimo igual ou ligeiramente superior ao calculado, caso não exista um comercial de diâmetro igual ao calculado.

Os atuadores giratórios devem ser dimensionados por dois critérios: em função do ângulo de giro necessário e do momento de torção que deve ser transmitido por seu eixo, e observando que as cargas radial e axial se mantenham menores que o valor máximo suportado pelo atuador.

$$Mt = F.d$$

Em que:

$$F = \text{força} [N]$$

$$d = \text{distância em} [m]$$

$$Mt = \text{momento de torção} [Nm]$$

Você pode observar como é importante em um projeto de máquinas a análise dos efeitos de esforços de tração, compressão, cisalhamento e torção, além do dimensionamento e seleção adequado de componentes e atuadores.

Sem medo de errar

Engenheiros, projetistas e cientistas estão continuamente desenvolvendo novos processos, materiais e projetos que podem ser utilizados nos mais variados tipos de máquinas e equipamentos. Para as impressoras 3D que serão fornecidas vamos fazer o cálculo para um dos parafusos que suportam as estruturas dessa máquina.

É necessário calcular o diâmetro mínimo necessário para que esse parafuso, quando fixado, não exceda a tensão normal máxima e, assim, não gere deformação nos entalhes de fixação.

São dados: $F = 60 \text{ KN}$; $\sigma = 0,3 \text{ MPa}$.

Vamos ver a resolução passo a passo:

Passo 1:

Iniciamos com a equação em que a tensão normal é máxima e a área deve ser mínima.

$$\sigma = \frac{F}{A_{\min}}$$

Passo 2:

Resolver em função da área mínima:

$$A_{\min} = \frac{60000N}{0,3 \cdot 10^6 N/m^2} = \frac{60000}{300000} = 0,2 \text{ cm}^2$$

Agora, vamos calcular o diâmetro, através dos cálculos:

$$A = \pi r^2$$

$$0,2 \text{ cm}^2 = \pi \cdot r^2$$

$$r^2 = \frac{\pi}{0,2}$$

$$r = 3,93 \text{ mm}$$

$$d = 2 \times 3,93 = 7,86 \text{ mm}.$$

Desta maneira, devemos utilizar um parafuso com um diâmetro igual a 7,86 mm no mínimo para suportar a carga.

Avançando na prática

Dimensionamento de uma prensa

Descrição da situação-problema

Ao fazer uma visita para um cliente em uma indústria, foi solicitado a você desenvolver um cilindro de uma prensa hidráulica. Porém, essa prensa hidráulica deve possuir algumas características, entre elas, ter um design moderno, pois ficará exposta em um ambiente com visita dos clientes.

Outra característica que a prensa deve possuir é de que tenha um acionamento rápido e que, ao final do curso desse cilindro atuador pneumático, ele exerça uma força.

A pressão de trabalho nesta empresa é de 6 kgf/cm^2 , a prensa deve exercer uma força de 30 kgf para executar o trabalho e assim fazer a prensagem da peça.

Diante destas informações como será o dimensionamento para esse atuador?

Resolução da situação-problema

Dimensionar um equipamento requer pesquisa, coleta de dados e cálculos. Além de verificar todos os tipos de materiais que podem ser utilizados, deve-se calcular o diâmetro para que este realize o trabalho necessário. Você está trabalhando em um projeto de um dispositivo e precisa definir um atuador pneumático que será utilizado para o deslocamento de uma mesa.

O atuador ficará exposto e, portanto, deve-se atentar ao design, o que requer identificar do tipo de material a ser utilizado para suportar a carga imposta. A pressão de trabalho é de 6 kgf/cm^2 , e o cilindro deve exercer uma força de 400 Kgf . Vamos aos cálculos:

$$Dp = 2 \cdot \sqrt{\frac{Fp \cdot \varphi}{\pi \cdot Pt}}$$

$$Dp = 2 \cdot \sqrt{\frac{400 \text{ kgf} \cdot 1,35}{\pi \cdot 6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}}$$

$$Dp = 10,7 \text{ cm.}$$

Deve-se, agora, proceder com a busca por um cilindro comercialmente disponível com a medida próxima à calculada.

Assim como o seu futuro depende das decisões que você toma hoje para resolver problemas, o sucesso das soluções de engenharia depende das decisões tomadas pelo engenheiro. Existe um procedimento comum aos mais variados tipos de problemas que pode ser seguido como um auxílio na tomada de decisões importantes, que inclui:

- Escolher critérios;
- Prever o desempenho das soluções selecionadas;
- Comparar as alternativas de acordo com o desempenho previsto;
- Escolher a solução.

Faça valer a pena

1. Nos equipamentos, a solicitação de uma força é muito comum, e as bases de máquinas devem suportar todas as cargas impostas. Um determinado parafuso foi submetido a uma carga de compressão e se rompeu com uma força de 500 kgf. O parafuso possui um diâmetro de 6 mm.

Assinale abaixo a alternativa que apresenta a resposta relacionada à resistência a compressão que este componente apresentou.

- a) $1785,7 \text{ kgf/cm}^2$
- b) $0,94 \text{ kgf/cm}^2$
- c) $594,0 \text{ kgf/cm}^2$
- d) $945,51 \text{ kgf/cm}^2$
- e) $0,53,94 \text{ kgf/cm}^2$

2. Escolher um material para construir um determinado equipamento é um desafio para o projetista, pois temos ao nosso dispor inúmeros tipos de materiais para construção. Os metais possuem características únicas e, através dessas características, obtemos as reações necessárias para a construção do equipamento projetado.

A respeito dos materiais disponíveis para construções mecânicas, assinale abaixo com um “V”, quando for verdadeiro, e um “F”, quando for falso.

- () Os metais podem ser considerados de duas formas: metais ferrosos e metais não ferrosos.
- () Os metais ferrosos são aqueles que têm um metal diferente do ferro como constituinte principal, como cobre, alumínio, latão, estanho, zinco, etc.

() A resistência interna oferecida por uma parte a uma força aplicada externamente é chamada tensão.

- a) $V - V - V$.
- b) $V - F - V$.
- c) $F - V - F$.
- d) $F - F - V$.
- e) $F - F - F$.

3. Os atuadores são dispositivos mecanicamente desenvolvidos para produzir força. São conhecidos também como cilindros pneumáticos, quando utilizam ar comprimido, ou hidráulicos, quando utilizam óleo hidráulico. Os cilindros pneumáticos vêm em várias aparências e tamanhos e destinam-se a desempenhar diferentes funções, dependendo das necessidades do projeto.

Assinale a alternativa que contempla o conceito de dimensionamento de atuadores:

- a) Atuadores são eixos e cilindros com curso, que podem ir de pequeno a médio e que servem para suportar qualquer carga transversal.
- b) Atuadores são dispositivos que, ao entrarem em contato com uma determinada pressão, podem reagir de maneira a esticar o material, fazendo assim a força de tração.
- c) Atuadores são elementos mecânicos que, por meio de movimentos lineares ou rotativos, transformam em energia pneumática a energia cinética gerada pelo ar pressurizado e em expansão, produzindo trabalho.
- d) Atuadores trabalham para absorver energia e resistir a choques e cargas de impacto.
- e) Atuadores são dispositivos adequados para gerar maior resistência ao conjunto quando submetidos a tensões repetidas.

Prototipagem

Diálogo aberto

Olá, caro aluno!

Quando uma máquina ou um equipamento é projetado, é necessário realizar muitas atividades, tais como um memorial de cálculos, a análise técnica, a construção de modelos e protótipos e a realização de testes neles, garantindo assim a viabilidade técnica e econômica para construção do equipamento. Atualmente, temos a nossa disposição diversas ferramentas e atividades que permitem verificar se um projeto, peça, máquina ou equipamento será funcional e trabalhará com segurança e eficiência.

Por exemplo, quando você utiliza uma Análise de Elementos Finitos em seu projeto, serão gerados cálculos cujos resultados permitem que você proceda uma otimização no projeto, através de alterações devidamente planejadas, além de poder reutilizar as muitas análises sempre que necessário durante o projeto. Outra vantagem com a utilização dessas ferramentas pode ser obtida quando se utiliza um software de simulação no começo do processo do projeto, o que pode ajudar a reduzir a confecção de protótipos caros, além de evitar ou reduzir a necessidade de mudanças na reta final do projeto, gerar melhorias no desempenho, vida útil e na segurança da máquina.

Você empreendeu e montou uma pequena empresa de fabricação de máquinas e, para potencializar os ganhos, participou de algumas licitações para produção de equipamentos para instituições de ensino, sendo o vencedor em uma delas para projetar e produzir impressoras. Como responsável da empresa, você sempre preza pela qualidade e confiabilidade de projetos e deve estar atento a cada uma destas etapas de projetos de máquinas.

Diante disso, foi incluso no contrato de fornecimento das impressoras 3D um treinamento sobre prototipagem. Esse treinamento também contemplará os princípios para realizar uma análise de elementos finitos com o uso de um software adequado, já que estes assuntos estão ligados em um projeto.

O treinamento idealizado pela sua empresa vai apresentar o projeto de uma peça utilizada em uma determinada máquina, em que será preciso fazer a análise por elementos finitos, bem como um protótipo. Assim considere a peça da Figura 2.20 e que ela está sujeita a esforços e vibração quando utilizada. O treinamento prevê a aplicação dos recursos de análise por elementos finitos utilizando o software *Autodesk Inventor* e a utilização dos recursos de prototipagem com impressão em 3D.

Diante desse desafio, quais as melhores a serem utilizadas para capacitar os usuários desses equipamentos? Você consegue apresentar a sequência apropriada de uso dos recursos de simulação do software *Autodesk Inventor Professional*, considerando que esta peça trabalha sujeita a esforços e vibrações? Você pode utilizar o módulo *Stress Analysis* para a análise dos modos de vibração desse elemento mecânico?

Uma dica é que após a apresentação dos comandos da barra de ferramentas, inicie a análise modal, ou análise dos modos de vibração e das frequências naturais. Lembre-se que você já utilizou este software na disciplina Desenho Técnico Mecânico, tendo, assim, condições de realizar a tarefa.

Figura 2.20 | Apresentação do ponto de fixação da peça para definição das condições de contorno



Fonte: Cruz (2016, p. 357).

Durante a seção, serão apresentados os seguintes conteúdos: análise por elementos finitos, prototipagem rápida, teste de modelos e protótipos e parâmetros do projeto pós-prototipagem. Entende-se que esses conteúdos, assim como aqueles já aprendidos durante o desenrolar do curso, são suficientes para a resolução da situação profissional apresentada.

Dedique-se com afinco neste assunto, pois é um assunto bastante importante aos que pretendem trabalhar com projetos de máquinas ou mesmo para os engenheiros que atuam como gestores.

Bons estudos!

Prezado aluno,

Os projetos de engenharia e de máquinas têm se tornado, ao longo do tempo, muito mais complexos, necessitando de ferramentas de análises mais elaboradas, confiáveis e com uma velocidade de análise maior.

Além de poder contar com ferramentas computacionais para a resolução de equações diferenciais e parciais, hoje podemos contar com tecnologias inovadoras, como a prototipagem 3D, por exemplo. Através dessas tecnologias, é possível testar e experimentar a criação, ou seja, o projeto elaborado. Vamos entender algumas destas ferramentas utilizadas no projeto de máquinas? Que tal iniciarmos estes estudos pela Análise por Elementos Finitos?

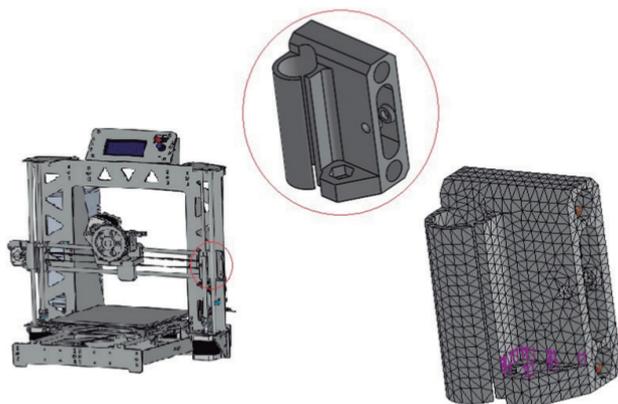
Milhões de engenheiros e cientistas em todo o mundo usam o Método de Elementos Finitos (MEF) para prever o comportamento estrutural, mecânico, térmico, elétrico e químico de sistemas, tanto na etapa de projeto como na de análise de desempenho (FISH, 2009, p. 1).

Mas o que é análise de elementos finitos? Trata-se de uma técnica que tem como finalidade resolver alguns tipos de problemas no ramo de engenharia, utilizada em casos de problemas em que não exista um equacionamento ou função matemática já prontos, o que dificulta muito chegar a uma solução exata.

Em uma situação em que é necessário solucionar um problema de engenharia através de uma determinada equação diferencial parcial resultante para uma geometria complicada, como a de um bloco de motor, é impossível chegar à solução pelos métodos clássicos, como o da separação de variáveis. Outra situação se dá para o caso de métodos numéricos, como os métodos de diferenças finitas, em que o grau de complexidade torna a aplicação em perfis arbitrários muito improvável. Ocorre o mesmo para a análise de tensões em que é necessário utilizar equações diferenciais parciais, extremamente difíceis de resolver através dos métodos clássicos, quando consideradas as formas complexas que encontramos na engenharia.

O MEF trabalha dividindo um corpo em elementos finitos, também nomeados apenas como elementos, que são conectados por nós. Essa divisão dos elementos finitos deve proporcionar uma solução aproximada, como apresentado na Figura 2.21. Nesta figura, você verá em evidência uma peça da impressora 3D contendo a chamada malha de elementos finitos. O processo para a construção desta malha é conhecido por geração da malha. Há três formas básicas utilizadas para gerar uma malha de elementos: manualmente, semiautomática e totalmente automática.

Figura 2.21 | Componente de máquina dividida em vários elementos



Fonte: elaborada pelo autor.

Os elementos podem ter várias formas em duas dimensões, quadrilateral ou triangular, e em três dimensões, em forma de tijolo (hexaédrica), de cunha (pentaédrico) ou tetraédrica. Esta não é, evidentemente, uma lista exaustiva. O método por elementos supre uma metodologia sistemática, que determina uma solução com a utilização de um programa de computador.

Observe que os nós se apresentam nos cantos dos elementos e, de acordo com a quantidade e do tipo de elemento, podem se apresentar na parte lateral dos elementos ou, ainda, dentro do elemento. A análise dos elementos finitos calcula quanto os nós se deslocaram devido à carga específica aplicada ao modelo elementos finitos.

A Análise de Elementos Finitos pode ser dinâmica ou estática, e não linear e linear. Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Referem-se, em seguida, alguns aspectos que devem ser levados em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura (AZEVEDO, 2003, p. 3).



Assimile

Análise dinâmica ou estática

Ações sobre as estruturas na maioria das vezes são dinâmicas. Nesse caso, deve-se associar as forças de inércia com as acelerações a que os seus componentes estão sujeitos. Por isso, os efeitos dinâmicos devem ser considerados na análise de uma estrutura. Uma análise é dita

estática, quando as ações são aplicadas de forma bastante lenta e, assim, as forças de inércia são desprezadas.

Análise não linear ou linear

Em uma análise de uma estrutura sólida, consideramos que os deslocamentos provocados pelas forças exteriores aplicadas são desprezíveis quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nesses casos, podemos inferir que não acontece influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões (considerando que o estudo é realizado sobre a geometria inicial indeformada). Para os casos em que essa hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica.

Considera-se também, em relação ao material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear. Se essa simplificação não for considerada, deve-se utilizar os algoritmos específicos de análise não linear material.

Você certamente deve estar imaginando quais são as aplicações dos elementos finitos. Muito bem, conheça alguns exemplos de aplicações, apresentados por Fish (2009):

- Análise térmica e de tensões de peças industriais, tais como chips eletrônicos, dispositivos elétricos, válvulas, tubos, vasos de pressão e motores automotivos e aeronáuticos;
- Análises sísmicas de represas, plantas de potência, cidades e arranha-céus;
- Análise de impacto de carros, trens e aeronaves;
- Análise do escoamento de líquidos refrigerantes, poluentes e contaminantes, além de ar, em sistemas de ventilação;
- Análise eletromagnética de antenas, transistores e componentes de aeronaves;
- Análise de procedimentos cirúrgicos, tais como cirurgias plásticas, reconstrução maxilar, correção de escoliose e muitas outras.

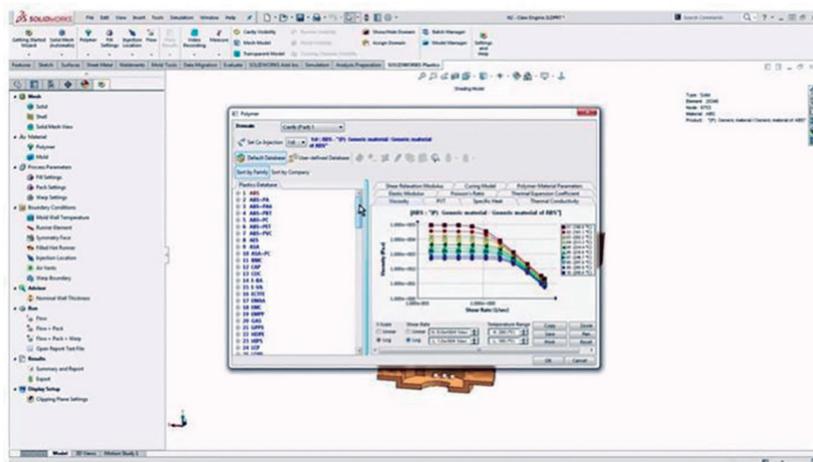
Três etapas são fundamentais para o usuário de análises por elementos finitos:

1. **Pré-processamento:** diz respeito à criação do modelo e à definição do modo de carregamento. O pré-processador inclui um software gráfico que permite ao usuário construir o modelo do componente a ser analisado

(desenho) e exibir o modelo na tela do computador. O sucesso de toda a análise é predominantemente determinado nesse estágio pela habilidade do usuário em determinar quais simplificações (se houver) devem ser introduzidas no modelo em comparação com o projeto real e pela escolha da malha e do tipo de elemento ser usado. Propriedades mecânicas ou físicas apropriadas devem ser alocadas ao material com que o modelo é feito, e as cargas devem ser posicionadas e aplicadas em qualquer restrição ao movimento de certos nós.

Uma das determinações para que o software possa executar corretamente a análise das tensões é a escolha ideal do material. Na Figura 2.22 é apresentada uma tabela para escolha das características e propriedade dos materiais:

Figura 2.22 | Escolha de material no software.



Fonte: Captura de tela do Introduction to *Solidworks Plastics*, elaborada pelo autor.

2. Análise: a parte de análise do módulo de elementos finitos coleta o arquivo de entrada, realiza determinadas verificações das informações nele contidas e, em seguida, se não houver erros no arquivo de entrada, a análise é executada e os arquivos de saída são produzidos. Estes contêm uma enorme quantidade de informação quando a análise é muito complexa. Esses arquivos podem ser examinados e as informações relevantes extraídas, mas, como regra, há tantas informações que precisam ser apresentadas ao usuário de uma maneira mais inteligível e fácil de usar. Esse é o trabalho do pós-processador. O pré e pós-processador são essencialmente o mesmo pacote de software.

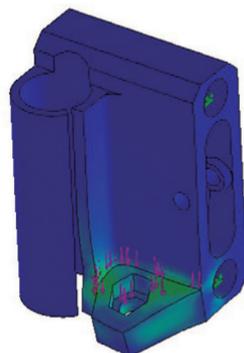
3. Pós processamento: o pós-processador coleta as informações dos arquivos de saída e pode apresentá-las ao usuário em uma variedade de diferentes formas gráficas e tabulares. Por exemplo, dependendo das

facilidades disponíveis, a cor pode ser usada para indicar o valor de algum componente de tensão na superfície do elemento, ou linhas de contorno de tensão igual podem ser desenhadas, como apresenta a Figura 2.23, ou formas similares de exibição podem ser produzidas em seções através do modelo.

Utilizando um software de modelagem após o pré-processador, o modelo pode ser girado e examinado sob diferentes pontos de vista, identificando pontos frágeis.

De acordo com Fish (2009), a Análise de Elementos Finitos de componentes estruturais reduziu significativamente o tempo do ciclo de um projeto e realçou a qualidade geral do produto. É muito importante para o profissional de engenharia ser capaz de utilizar os recursos de um software apropriado para essas análises. Uma ótima opção é o *Autodesk Inventor*.

Figura 2.23 | Linhas de contorno de tensão.



Fonte: elaborada pelo autor.



Pesquise mais

Confira no vídeo a seguir algumas dicas deste processo de análise, utilizando o software Autodesk Inventor.

RENDER CURSOS. **Como fazer análise de Elementos Finitos com o Inventor 2010.** 5 jan. 2010. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=VYOOJuCjGNo>. Acesso em: 21 jan. 2019.

Feitas as considerações acerca do MEF, passaremos a discutir sobre a prototipagem rápida. Segundo Dym (2010, p. 185):

- Os **protótipos** são “modelos originais nos quais algo é padronizado”. Eles também são definidos como as “primeiras formas em escala natural e normalmente funcional de um novo tipo ou projeto de uma construção”. Nesse contexto, os protótipos são modelos funcionais de artefatos projetados. Eles são testados nos mesmos ambientes de operação em que devem funcionar como produtos finais.
- Um **modelo** é “uma representação em miniatura de algo”, um “padrão de algo a ser feito” ou “um exemplo para imitação ou simulação”. Usamos modelos para representar alguns equipamentos ou processos. Podem ser de papel, modelos de computador ou modelos físicos.

A prototipagem ou modelagem é uma das etapas importantes para finalizar o design de um produto. Ajuda na conceituação de um projeto. Antes do início da produção total, geralmente, um protótipo é fabricado e testado. A prototipagem manual por um artesão experiente tem sido uma prática antiga por muitos séculos. A segunda fase da prototipagem começou por volta de meados da década de 1970, quando um protótipo macio modelado por curvas e superfícies 3D pôde ser enfatizado em ambiente virtual, simulado e testado com material exato e outras propriedades.

A terceira e mais recente tendência de prototipagem, ou seja, Prototipagem Rápida (RP) por deposição de material de camada por camada, começou no início dos anos 80 com o enorme crescimento das tecnologias de Projeto e Manufatura Assistida por Computador (CAD / CAM) quando modelos sólidos em que uma malha foi determinada, com informações de bordas e superfícies de malha, podem definir um produto, podendo também fabricá-lo por usinagem CNC.

Assim, prototipagem rápida (PR) é uma nova técnica de fabricação que permite a construção rápida de modelos elaborados a partir de um software auxiliado por um computador (CAD) tridimensional (3D). A PR é usada em uma ampla variedade de indústrias, desde fabricantes de calçados até fabricantes de automóveis. Essa técnica permite a rápida realização de ideias em protótipos funcionais, encurtando o tempo de projeto, levando a produtos de sucesso com tempo mais curto que o tempo de fabricação tradicional. Os métodos de PR agregam e ligam materiais camada a camada, de forma a confeccionar a peça ou o objeto definido.



Refleta

Existe diferenças entre as definições e aplicações de protótipo e modelo? Se você entende que são diferentes, qual a função de um protótipo e de um modelo em um projeto de máquinas?

Você conhece o princípio básico dos processos de prototipagem rápida? Vamos estudar? O processo de PR pertence aos processos de produção generativos (ou aditivos), ao contrário dos processos subtrativos ou de formação, como torneamento, fresamento, etc., cujo perfil da peça é formado pela remoção do material. Em todos os processos comerciais de PR, a peça é fabricada pela deposição de camadas contornadas em um plano (x-y) bidimensionalmente. A terceira dimensão (z) resulta de camadas únicas sendo empilhadas uma em cima da outra, mas não como uma coordenada z contínua. Uma impressão 3D trabalha com um arquivo 3D, que é criado por uma ferramenta CAD, depois salvo numa versão STL e enviado para a placa

controladora eletrônica por meio de um GCode, que faz a leitura e interpreta as coordenadas enviadas pelo software CAD e envia as informações de passos para os motores. Isso ocorre sucessivamente em todos os eixos, com o material sendo depositado em camadas, dando origem às peças de acordo com as instruções passadas no CAD.



Exemplificando

Para realizar uma impressão 3D, há diversas tecnologias de prototipagem rápida, disponíveis no mercado. Por exemplo:

- Estereolitografia (SLA)
- Digital Light Processing (DLP)
- Modelagem por fusão e deposição (FDM)
- Manufatura laminar de objetos (LOM)
- Tecnologia com lâminas de papel (PLT)
- Sinterização seletiva a laser (SLS)
- Impressão tridimensional (3DP)
- Sinterização de pó de metal (SLM)
- Multi Jet Modeling (MJM)

Cada metodologia apresenta seus benefícios e desvantagens e sua escolha depende de discernimentos e necessidades exclusivas de cada companhia ou mercado.

Vamos, agora, compreender sobre os aspectos relacionados aos **testes de modelos e protótipos**.

Você já viu que a prototipagem rápida desempenha um papel fundamental para o projetista de máquinas, pois, através dela, podemos construir protótipos com uma velocidade maior que os meios tradicionais de processos de fabricação. A gama abrangente de métodos de modelagem e prototipagem está sendo usada para estimular a criatividade e desenvolver a funcionalidade e a aparência de um produto antes de ele entrar em produção. É uma ferramenta que permite aos designers refletirem sobre suas atividades de design e explorarem o espaço do projeto, levando em consideração questões estéticas, ergonômicas, de mercado e de produção.

Teste Baseado em Modelo tornou-se um termo muito popular nos últimos anos. Em geral, a ideia do Teste Baseado em Modelo é criar modelos de teste funcional baseados em requisitos, os requisitos são cuidadosamente revisados, criando modelos de teste. Uma vez criados, esses modelos de teste são usados para gerar casos de teste, que podem ser usados para execução de testes manuais e/ou automatizados, resolvendo, assim, problemas que podem estar imbuídos num sistema.

Quando se fala em projeto, a **prova de conceito** é o tipo de teste mais importante. Ela serve para apresentar um novo conceito, um equipamento ou, ainda, se uma configuração específica funciona conforme seu projeto. Podemos considerar os testes de prova de conceito como trabalhos científicos, em que são determinadas hipóteses fundamentadas e apoiadas, que deverão ser testadas para validação ou não. Neste caso, uma prática deve ser projetada, contendo as hipóteses consideradas reprovadas, dependendo dos resultados obtidos. Não se pode esquecer que protótipos e modelos têm propósitos diferentes. Segundo Dym (2010, p. 186, grifo nosso):

“Os protótipos destinam-se a **demonstrar que um produto funcionará conforme foi projetado**, de modo que são testados em seus ambientes operacionais reais ou em ambientes não controlados semelhantes o mais próximo possível de seus “mundos reais” relevantes. Os modelos são intencionalmente testados em ambientes controlados que permitem ao seu construtor (e ao projetista, se não for a mesma pessoa) **entender o comportamento ou fenômeno em particular que está sendo modelado**.”

Outro ponto a se considerar é que, ao fazer testes de prova de conceito, realizamos experiências controladas em que uma não rejeição de um conceito pode ser algo significativo.

Por fim, chegamos ao momento de abordar os **parâmetros do projeto pós-prototipagem**.

As empresas usam protótipos para coletar comentários detalhados dos clientes sobre questões como estética e ergonomia, bem como para pesquisa de marketing e análise de custos. A prototipagem é usada pelos engenheiros para fornecer dados de fabricação e montagem, investigar problemas de integração de sistemas e desenvolver estratégias de análise e teste. Em alguns casos, a prototipagem também é usada na fase de geração de conceito do processo de design para ajudar os projetistas a expandir ou contrair o conjunto de conceitos possíveis. Claramente, a prototipagem é uma parte importante na maioria dos processos de design.

Devemos observar que uma parte do processo de modelagem é a proposição de uma teoria e que uma segunda parte compreende coletar e analisar dados e, finalmente, tirar as conclusões. Podemos encontrar diferenças entre dados coletados numa situação concreta de uso e os valores antevistos na teoria, mesmo que a teoria seja considerada muito boa, e, assim, uma análise de dados pode ser encarada como uma ciência em particular. Os cientistas

e engenheiros utilizam algumas ferramentas matemáticas e gráficas para analisar resultados e dados quando estão elaborando e utilizando modelos.

Brockman apresenta uma introdução sobre modelos empíricos que diz:

“ Em muitas situações, é difícil ou pouco prático prever o comportamento de um sistema com base em teorias científicas. Nesses casos, os engenheiros costumam usar modelos empíricos baseados em dados experimentais. Às vezes, os cientistas planejam e executam um experimento específico para colher dados com o objetivo de criar um modelo empírico. Em outras ocasiões, os dados são o resultado de análises de projetos mais antigos. A indústria aeroespacial, por exemplo, acumulou décadas de informações a respeito do desempenho de diferentes formas de asas em diferentes condições de voo, e usa esses dados para criar novos modelos.

Ao contrário dos modelos teóricos, os modelos empíricos não tentam explicar por que um sistema se comporta de uma certa forma, e sim prever, com a maior precisão possível, como vai se comportar em certas condições. (BROCKMAN, 2013, p. 120)

Quanto aos parâmetros, após a construção de um modelo, de uma máquina ou outro produto, estes devem ser baseados em testes realizados no próprio equipamento construído e em normas, e devem atender a requisitos mínimos, como colocar em funcionalidade um sistema já verificado por um software. Devem ser abordados os ensaios que possam atuar no desenvolvimento conceitual do produto, na certificação funcional ou mesmo da estrutura física de uma máquina ou dispositivo, entre outros, como:

- Testes durante a concepção do equipamento, como ensaios de tração ou compressão;
- Testes para durabilidade da máquina ou dispositivo;
- Verificação do desempenho;
- Ensaios de normas.

Os resultados obtidos por esses ensaios geram condições e informações para a realização de correções, modificações e ou melhorias dos protótipos construídos.



Pesquise mais

Quer saber mais sobre como testar modelos e equipamentos? Não deixe de assistir ao vídeo *Conheça o centro de testes e campo de provas da Ford*, que fala sobre o teste de um veículo. Nele você pode perceber o cuidado com a representação da utilização do equipamento. Note também, que um teste deve representar ao máximo a sua aplicação do cotidiano e que, ao final dos testes, todos os equipamentos são destruídos.

CANALTECH. **Conheça o centro de testes e campo de provas da Ford.** 10 dez. 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=7owJ-zx8BQbU>. Acesso em: 21 jan. 2019.

Nesta seção, você aprendeu conceitos importantes a serem utilizados em um projeto de máquinas. Análise por Elementos Finitos, Prototipagem Rápida, teste de modelos e protótipos, parâmetros do projeto pós-prototipagem são atividades que não podem faltar e que, se forem bem planejadas, estruturadas e realizadas, geram muitos ganhos ao projeto.

Sem medo de errar

Você é o engenheiro mecânico responsável por uma empresa que ganhou a licitação para fornecer impressoras 3D para uma instituição de ensino e está preparando um treinamento sobre impressão 3D e seus parâmetros de ajustagem. Além dos parâmetros de impressão que devem ser abordados, você também necessita instruir todos os usuários sobre como utilizar o software *Autodesk Inventor* para a análise por elementos finitos da peça apresentada. Diante desse desafio, quais as melhores formas a serem utilizadas para capacitar os usuários destes equipamentos? Você consegue apresentar a sequência apropriada de uso dos recursos de simulação do software *Autodesk Inventor Professional*, considerando que a peça trabalha sujeita a esforços e vibrações?

A melhor forma para capacitar o usuário é definir uma rotina de treinamento no qual ele utilizará e praticará as ferramentas do software *Autodesk Inventor* analisando a peça proposta na Figura 2.20. Para a prototipagem é importante que o usuário utilize a própria impressora 3D para construí-lo, aprendendo assim os comandos e o processo de realização da tarefa.

Para análise por elementos finitos da peça indicada na Figura 2.20, uma ótima opção é a utilização do módulo *Stress Analysis*, que serve para a análise dos modos de vibração desse elemento mecânico e para a análise paramétrica estática da peça.

Desenhe em 3D a peça apresentada na Figura 2.20. Note que não adotamos medidas nesta figura de referência, assim, adote medidas proporcionais para que o desenho e a peça representem bem as análises que serão executadas. Sugestão para algumas medidas bases: distância entre centro para os diâmetros com mesmo alinhamento = 80 mm; distância entre os dois furos com mesmo alinhamento e furo central = 30 mm; altura da peça = 25 mm.

Figura 2.20 | Apresentação do ponto de fixação da peça para definição das condições de contorno



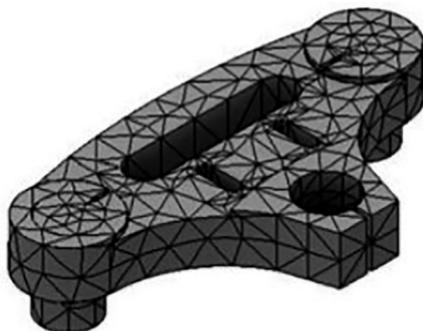
Fonte: Cruz (2016, p. 357).

Agora, vamos verificar os passos do processo para essa análise por Elementos Finitos que pode ser aplicada ao treinamento.

- Inicialmente, apresente para os usuários o módulo de análise por Elementos Finitos *Stress Analysis* do *Inventor*. Para realizar essa apresentação do módulo, acesse o guia *Environments* e selecione o comando *Stress Analysis* na barra *Begin*. Na sequência, apresente as ferramentas de análise disponíveis na barra de ferramentas do módulo *Stress Analysis*.
- Com a apresentação dos comandos da barra de ferramentas realizada, inicie a análise modal, ou análise dos modos de vibração e das frequências naturais da peça.
- Para isso, selecione o *Stress Analysis* novamente para definir o tipo de análise que deverá ser realizada.
- Para definir o tipo de análise, selecione o comando *Create Simulation* e escolha o tipo *Modal Analysis* juntamente com a quantidade de modos de vibração, sendo que o padrão é 8 modos.
- Defina o tipo de material da peça com o comando *Assign*. Como sugestão, selecione o *Aluminun 6061* no menu *Override Material*.

- Defina as condições de contorno através do acesso ao comando *Fixed*, no painel *Constraints*. Selecione a face interna da peça, conforme mostra a Figura 2.20.
- Para visualizar a malha com os elementos finitos, selecione o botão *4Mesh View*. Para voltar ao modelo normal, selecione o botão novamente.

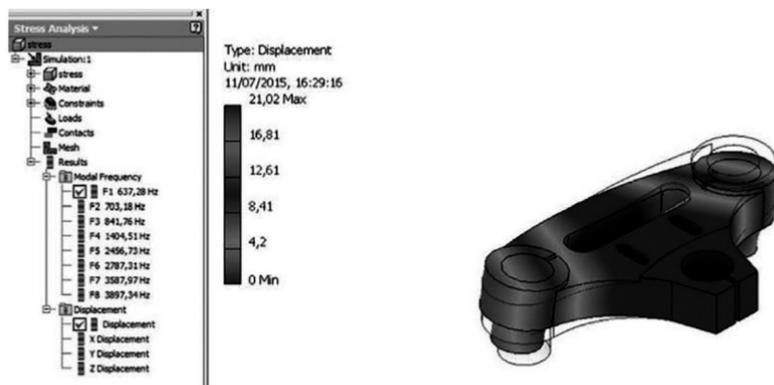
Figura 2.24 | Imagem com a visualização da malha por elementos finitos



Fonte: Cruz (2016, p. 357).

- Execute a análise ativando o comando *Simulate* do painel *Solve*.
- Verifique os resultados. Na Figura 2.25, você pode identificar 8 frequências e seus respectivos modos de vibração.
- Faça uma animação da análise pressionando o botão *animate* da barra de ferramentas.

Figura 2.25 | Apresentação dos resultados da análise por elementos finito

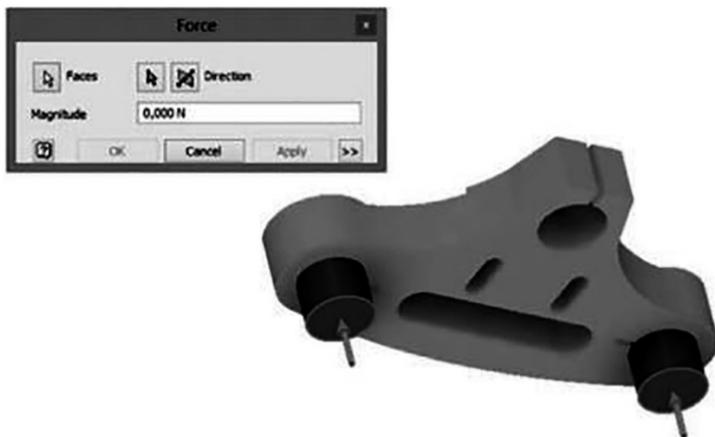


Fonte: Cruz (2016, p. 358).

Outra análise importante a ser realizada no treinamento é a análise paramétrica estática da peça. Para essa etapa, será necessário apresentar os recursos de simulação do software *Autodesk Inventor Professional*, com a utilização do módulo *Stress Analysis*. Assim, vamos considerar os passos para realizar essa atividade no treinamento.

- Faça uma cópia da análise anterior para aproveitar algumas definições já realizadas. Para obter esta cópia, clique com o botão direito do mouse no browser sobre *Simulation* e escolha *Copy Simulation*.
- Clique com o botão direito do mouse sobre a nova simulação, escolha a opção *Edit Simulation Properties* e renomeie para *Parâmetros*.
- Altere *Design Objective* para *Parametric Dimension* e o *Simulation Type* para *Static Analysis* e selecione OK.
- Aplique forças ao modelo. Para isso, selecione o botão *Force* e depois as duas faces inferiores da peça, conforme apresentado na Figura 2.26

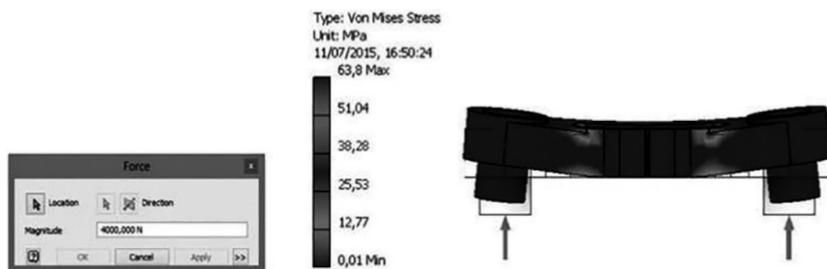
Figura 2.26 | Indicação de aplicação das forças na peça



Fonte: Cruz (2016, p. 360).

- O próximo passo é ajustar o valor da força. Considere o valor igual a 4000 N.
- Execute a análise. Para isso, ative o comando *Simulate* do painel *Solve*.
- Observando os resultados, é possível identificar os pontos com os maiores valores de tensão na peça, conforme mostra a Figura 2.27.

Figura 2.27 | Resultados da análise



Fonte: Cruz. 2016. p.360.

- Utilize o modelo de elemento mecânico para impressão em 3D.

Agora, vamos definir como realizar a confecção de um protótipo do elemento mecânico com a utilização de uma impressora 3D. É válido lembrar que a impressão 3D é considerada uma tecnologia que produz objetos e peças físicas de forma automática, a partir de modelos virtuais 3D CAD, que tenham geometria limitada.

É importante apresentar ao usuário as vantagens de uma impressão 3D nos processos de prototipagem, gerando valor através de velocidade de produção (exceto quando comparado a processos de manufatura mais tradicionais), qualidade e amplitude de possibilidades. Apresentar ao usuário que a prototipagem em impressora 3D é bastante competitiva e vantajosa, mesmo que seus tempos seja maior quando comparado com os processos de manufatura tradicionais, pois a confecção de um molde para estes processos tradicionais traz altos custos e tempos longos para serem realizados. Outra vantagem da impressão 3D é no quesito qualidade, que pode ser facilmente comparada com o produto final, quando utilizada uma tecnologia adequada.

Os passos que podem ser indicados no treinamento são sintetizados em:

- Elabore um desenho, geralmente em 3D, chamado de modelagem.
- Observe que, após a elaboração da peça por meio de um software gráfico (CAD), pode-se exportar esse arquivo para um sistema de manufatura aditiva (CAM).
- Utilize uma impressora 3D e fatie as camadas do desenho. Tudo isso é realizado por meio de programas específicos.
- Após a preparação desta peça para impressão, inicia-se o processo de prototipagem,

- Deposite o material em camadas nos pontos específicos, dando origem à peça, conforme os exemplos apresentados na Figura 2.28.

Figura 2.28 | Peças feitas por impressora 3D.



Fonte: <http://assets.cimm.com.br/uploads/cimm/produto/imagem/27408/engenharia-de-produto-prototipagem.jpg>. Acesso em: 11 jan. 2019.

Após a construção de uma peça, é possível verificar pontos de melhorias e ensaios para determinar a vida útil do componente.

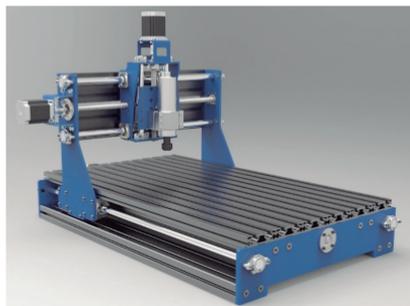
Avançando na prática

CNC Router

Descrição da situação-problema

CNC Router é o nome dado para um equipamento de pequeno porte que realiza usinagem em madeiras. Você, como estudante de Engenharia Mecânica, foi convidado por amigos para desenvolver e construir um desses equipamentos para fabricação de brindes em uma feira que ocorre todo ano na faculdade. Você acha possível desenvolver esse projeto sem a utilização de um software? Que ferramentas computacionais você pode utilizar no projeto? Existe alguma vantagem na utilização dessas ferramentas? Você poderia utilizar a prototipagem nessa produção?

Figura 2.29 | CNC Router.



Fonte: <https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/screenshots/pics/206c4ac5680e935a5f6d533866f2c3b5/large.jpg>. Acesso em: 21 jan. 2019.

A CNC Router trabalha com três eixos, x, y e z, e possui um cabeçote de alta rotação acima de 10.000 rpm. Você certamente não vai ficar de fora desse desafio!

Resolução da situação-problema

A construção de uma CNC Router deve levar em consideração a precisão na fabricação das peças. Para iniciar a construção de um determinado equipamento, é necessário um projeto bem delimitado, que atenda às necessidades de quem o irá confeccionar e utilizar.

Após esse primeiro passo, é necessário detalhar todos os componentes. Essa atividade pode ser feita até mesmo a mão, utilizando prancheta e lapiseira, mas é bem provável que você construa o desenho utilizando um software gráfico, que lhe dará algumas vantagens, tais como:

1. Velocidade para construir todas as peças;
2. Facilidade para montar e visualizar os elementos da máquina;
3. Oportunidade para análise por Elementos Finitos cada um dos componentes, verificando a capacidade de carga, vida útil, fadiga, tensão e cisalhamento entre outros dados;
4. Visualização da estética do equipamento.

Além desses fatores, você ainda deve utilizar um software de comando para a máquina, visto que é uma máquina de Comando Numérico Computadorizado (CNC) e que é necessário comandá-la utilizando um computador.

Após a identificação de todos estes fatores, é necessário construir a máquina e, para isso, você determinou que algumas peças podem ser fabricadas por usinagens convencionais, usinagens CNC, incluindo corte a laser da estrutura da máquina, e uma parte dos componentes pode ser fabricada por prototipagem rápida.

Faça valer a pena

1. No procedimento de desenvolvimento de projetos de máquinas, diversos estágios ou fases são imprescindíveis até que se atinja o produto de acordo com o que cliente deseja, tais como, idealização do produto, concepção do conceito, desenho da máquina, detalhamento, entre outros. O método de análise por Elementos Finitos auxilia muito a criação, pois pode desvendar possíveis falhas e até mesmo prever a vida útil de um componente. Três etapas são fundamentais para aplicação da análise por elementos finitos: pré-processamento, análise e pós processamento.

Assinale abaixo a alternativa que apresenta o conceito para aplicação da análise por Elementos Finitos:

- a) Coleta as informações dos arquivos de saída e pode apresentá-las ao usuário em uma variedade de diferentes formas gráficas e tabulares.
- b) Coleta o arquivo de entrada, realiza determinadas verificações das informações nele contidas e, em seguida, se não houver erros no arquivo de entrada, a análise é executada e os arquivos de saída são produzidos.
- c) Diz respeito à criação do modelo e à definição do modo de carregamento, inclui um software gráfico que permite ao usuário construir o modelo do componente a ser analisado (desenho) e exibir o modelo na tela do computador.
- d) Consiste na elaboração detalhada do desenho ainda na prancheta em que o projetista coleta as informações, analisando cada uma das linhas e traços.
- e) Faz parte da construção do componente, em que, após a fabricação das peças, pode-se analisar cada componente utilizando sistemas de medições.

2. O avanço da tecnologia é cada vez mais rápido, tanto em desenvolvimento quanto em fabricação de peças e componentes, todos com o objetivo comum de facilitar a vida dos usuários. As impressoras 3D certamente contribuíram para essa evolução, dando liberdade ao projetista para confeccionar um protótipo de seus projetos em pequena escala, mas com riqueza de detalhes e complexidade.

Com relação ao processo de impressão 3D, assinale abaixo com um “V”, quando a afirmação for verdadeira, e um “F”, quando for falsa:

- () A impressora 3D faz o mesmo serviço que a impressora convencional, só que, em vez de simplesmente colocar a tinta em cima de uma folha, ele cria objetos em três dimensões.
- () A prototipagem rápida é uma nova técnica de fabricação que permite a construção lenta de modelos a partir da sua elaboração em um software auxiliado por um computador (CAD) em 2D.
- () A impressão 3D trabalha com um arquivo 3D, que é criado por uma ferramenta CAD e, depois, esse mesmo arquivo é salvo numa versão STL.
- () As impressoras 3D conseguem imprimir qualquer tipo de perfil utilizando a tecnologia de impressão tridimensional.

Agora, assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA para V ou F.

- a) V - V - V - V.
- b) F - F - F - F.
- c) V - V - F - F.
- d) V - F - V - V.
- e) F - F - V - F.

3. Um processo de desenvolvimento de máquinas e/ou produtos demanda a tomada de decisões assertiva em relação às necessidades do projeto. As principais questões

abordadas pelos testes de produtos se enquadram em três categorias que refletem os problemas de negócios subjacentes e o estágio em que ocorrem no processo de desenvolvimento de produto assim como em projetos de máquinas. Estas três categorias são: triagem, otimização e estimativa.

No que tange a otimização utilizada em projetos, podemos dizer que as empresas têm utilizado a simulação virtual para otimizar produtos e conceitos de uma forma interessante.

Agora, assinale abaixo a alternativa que apresenta o conceito de otimização em um projeto de máquinas ou produtos:

- a) Nos primeiros estágios do desenvolvimento de uma máquinas ou produto, ideias para novos produtos estão sendo geradas e apenas investigações preliminares da viabilidade do conceito são realizadas.
- b) É a prática de fazer mudanças ou ajustes em um produto para torná-lo mais desejável e viável, do ponto de vista comercial, podendo ocorrer através de criação de novas máquinas ou produtos que incorporam um novo conceito de design. Outro aspecto, é o aumento da eficiência, através da economia de recursos e redução de falhas no processo.
- c) Quando uma máquina ou um produto já está concebido, isto é, pronto ou sujeito apenas a pequenas modificações, o teste é usado para estimativa de demanda.
- d) Trata-se de um processo de validação de seus projetos desde o desenvolvimento do conceito até a produção final dos lotes para comercialização. É composto por testes e lotes pilotos que irão definir pela aprovação ou para uma produção em série.
- e) É a capacidade de diminuir o tempo que o projetista utiliza para a construção de um modelo ou do projeto em si. Este tipo de otimização ocorre apenas com alterações em desenhos que são produzidos durante o projeto.

- Azevedo, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1. ed. Portugal: FEUP, 2003. Disponível em: http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/Livro_MEF_AA.pdf. Acesso em: 15. jan. 2019.
- Brockman, J. B. **Introdução à engenharia**: modelagem e solução de problemas. Tradução e revisão técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. Tradução: João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar, José Benaque Rubert. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- COLLINS, J. A., BUSBY, HENRY R., STAAAB, G. H. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CRUZ, M. D. **Autodesk Inventor 2016 Professional**. São Paulo: Érica, 2015. 360 p.
- DYM, C. L.; LITTLE, P.; ORWIN, E. J., SPUJT, R. E. **Introdução à engenharia**: uma abordagem baseada em projeto. 3. ed. Tradução: João Tortello. Porto Alegre : Bookman, 2010.
- ENSUS ENGENHARIA LTDA. **Fadiga** – Aula 5. 7 jun. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TqbTnuFtj30>. Acesso em: 11 dez. 2018.
- FIALHO, A. B. **Automação Pneumática - Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos**. 7. ed. São Paulo: Érica, 2011.
- FISH, J. **Um primeiro curso em elementos finitos**. Tradução e revisão técnica: Ricardo Nicolau Nassar Koury, Luiz Machado. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- JUVINALL, R. C., MARSHEK, K. M. **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- FÁBRICA DE IMAGENS. **Manual de Impressão 3D**. V. 3.7. Disponível em: <http://www.fabricaimagens.com.br/image/arquivo/manual-de-impressao-3d-web-3442682349.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2019
- NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- VIDOSIC, J. P. **Machine Design Projects**. Nova Iorque: Ronald Press, 1957.

Unidade 3

Dimensionamento do sistema de transmissão de potência

Convite ao estudo

Caro aluno, entramos na Unidade 3 em que você terá a oportunidade de absorver alguns conteúdos para construção do seu aprendizado. Agora vamos dar mais um passo. Na Unidade 2 aprendemos como fazer uma análise e modelagem básica de uma máquina. Mas agora é necessário saber como transmitir potência para essa máquina.

Nesta unidade vamos apresentar como realizar um dimensionamento do sistema de transmissão de potência. Nesse tipo de sistema são utilizados como fonte os motores para transmissão dessa potência, bem como elementos de ligação os quais esperamos que você conheça, compreenda e seja capaz de dimensionar.

Para que você possa alcançar as competências esperadas, consideremos então o seguinte contexto. Você trabalha na área de desenvolvimento de novos produtos. A empresa é uma tradicional fornecedora de implementos agrícolas do agronegócio brasileiro. A seguir, a Figura 3.1 apresenta algumas imagens que ilustram alguns produtos desenvolvidos pela empresa.

Figura 3.1 | Implementos agrícolas que possuem sistema de transmissão



(a) Enxada rotativa

(b) Grade de disco

(c) Roçadeira

Fonte: www.lavrale.com.br. Acesso em: 29 jan. 2019.

Você foi contratado como projetista pelo diretor da área de projetos, sendo designado para especificar e dimensionar o mecanismo de transmissão e acionamento do novo implemento agrícola lançado. Note, como mostrado na Figura 3.1, que os implementos agrícolas da empresa possuem partes móveis que precisam de potência para operar adequadamente.

Sabendo que a empresa se encontra em fase de expansão mercadológica

e participando ativamente de processos concorrenciais junto aos seus potenciais clientes, o diretor externou a você algumas demandas que poderiam se trabalhadas em sua linha de produtos, como:

- Definir as variáveis relevantes para a escolha da transmissão.
- Escolher o tipo de transmissão de potência.
- Dimensionar a transmissão.
- Projetar a transmissão.

Como você sabe, transmissões de potência são muito comuns no mundo da engenharia mecânica, e, em especial, em aplicações para agricultura.

Porém como dimensioná-las? Qual tipo de transmissão deve ser utilizado?

Nesta unidade veremos como definir os elementos de transmissão e como dimensioná-los. Além disso, serão analisados os elementos de ligação desses sistemas e no final veremos como realizar um projeto desse sistema de transmissão.

Então, mãos à obra.

Dimensionamento do sistema de transmissão de potência

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção estudaremos a importância do dimensionamento de um sistema de transmissão de potência. Porém para dimensionar é necessário antes definir quais são os elementos que compõem e a fonte de potência desse sistema. Veremos também que essa transmissão pode ser realizada por atrito. Para isso, precisam ser feitos os cálculos cinéticos e cinemáticos, bem como a avaliação das forças de atrito e de contato. Não podemos esquecer que esse assunto é muito importante quando se trata de máquinas, considerando que elas necessitam de potência para seu funcionamento.

Diante do contexto apresentado e, para que você alcance os objetivos traçados para essa aula, vamos relembrar do nosso contexto? Lembra-se que você foi contratado por uma empresa de implementos agrícolas para ser o projetista? Que foi designado a você especificar e dimensionar o mecanismo de transmissão e acionamento para um novo produto?

Você como projetista precisa escolher qual sistema de transmissão vai utilizar no seu equipamento agrícola. Essa empresa está tentando ganhar mercado na Região Centro-Oeste do Brasil e pretende lançar um novo produto.

Seu diretor possui algumas informações sobre torque e rotação que são necessárias nesse tipo de equipamento. Agora você precisa começar a projetar. O motor desse equipamento deve apresentar um torque de 40 kgf.m e uma rotação máxima de 2.400 rpm. Para esse caso, será utilizada a transmissão por correias. O eixo do motor é tubular e possui um diâmetro externo de 40 mm e um diâmetro interno de 20 mm.

Existem alguns tipos de sistemas de transmissão de potência, como as correias, as polias, as engrenagens, etc. Qual será o melhor sistema de transmissão para esse tipo de equipamento? Além disso, qual potência será transmitida? Quais são as especificações dos elementos de transmissão? Os parâmetros como potência e torque desses elementos precisam ser dimensionados, bem como as forças que atuam no sistema. Qual tipo de transmissão deve ser utilizado, por força de atrito e de contato?

Aproveite para desenvolver conhecimento e bons estudos.

Olá!

Os sistemas de transmissão estão presentes em diversas situações. O exemplo de maior destaque é a transmissão de energia gerada pelo motor de um carro para as rodas.

Um sistema de transmissão de potência tem como objetivo transmitir potência, torque ou rotação para os elementos que compõem uma máquina. Para que esse sistema tenha um bom funcionamento e bom rendimento é necessário que o dimensionamento seja bem realizado. Uma característica que marca esse tipo de sistema é a rotação, pois por meio da rotação é possível transmitir potência ocupando um espaço muito menor do que com o movimento de translação.

Logo, um sistema de transmissão nada mais é do que um conjunto de elementos que é capaz de movimentar uma máquina.

Uma das fontes de alimentação das máquinas é o motor. O motor transmite potência para todo o conjunto da máquina. Mas o que é potência? Potência é a quantidade de energia fornecida a uma fonte a cada unidade de tempo. Ou seja, é a rapidez com que uma quantidade de energia é transformada em trabalho. (COLLINS, 2006)

$$P = T \times \frac{d\theta}{dt}$$

Onde:

P = potência

T = torque

$d\theta$ = ângulo de rotação

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Onde:

ω = rotação

Portanto:

$$P = T \times \omega$$

COMO DIMENSIONAR UM SISTEMA

O dimensionamento de um sistema de transmissão de potência é importante, pois é necessário saber a perda de potência associada a ele. Essa perda é dissipada em parte sob a forma de energia que é transformada em calor ou atrito entre os elementos e a outra parte é transformada em trabalho. O Quadro 3.1 apresenta os valores normais de rendimento (η) para os elementos do sistema.

Quadro 3.1 | Rendimento dos elementos de máquinas

Tipo de transmissão	Rendimento
Correia em V	$0,97 \leq \eta_c \leq 0,98$, onde η_c é o rendimento da correia em V
Engrenagens usinadas	$0,96 \leq \eta_e \leq 0,98$, onde η_e é o rendimento da engrenagem usinada
Rolamento (par)	$0,98 \leq \eta_m \leq 0,99$, onde η_m é o rendimento do par de rolamento

Fonte: adaptado de Melconian (2012, p. 43).

Feitas as considerações iniciais sobre os sistemas de transmissão e seu dimensionamento, iremos abordar, agora, as fontes de potência.

Como já descrito anteriormente, uma fonte de potência é o elemento que transmite uma quantidade de energia para um sistema. Esses elementos de transmissão podem ser:

I – Eixos fixos e eixos-árvores

Eixos são elementos fixos de máquina. Eles não são submetidos ao esforço de torção, mas apenas suportam as rodas ou polias. Já as árvores são elementos que giram para que a potência seja transmitida. Os eixos de transmissão são usados em praticamente todas as máquinas para transmitir torque ou rotação de um ponto a outro. Os eixos possuem basicamente dois tipos de cargas: torção devido ao torque e flexão devido às cargas transversais (NORTON, 2013).

O cálculo da potência transmitida por um eixo e sua rotação pode ser definido como:

$$P = 2\pi fT$$

$$T = \frac{\tau_{adm} \times J}{R}$$

$$J = \frac{\pi R^4}{2}, \text{ para eixo maciço}$$

$$J = \frac{\pi(R_0^4 - R_i^4)}{2}, \text{ para eixo tubular}$$



Exemplificando

Considere um eixo tubular de diâmetro interno de 20 mm e diâmetro externo de 40 mm. Esse eixo é utilizado para transmitir 80 kW de potência. Se esse eixo precisa ter uma rotação que não exceda a tensão de cisalhamento de 40 MPa, qual seria a frequência de rotação?

Resolvendo esse problema, temos:

$$J = \frac{\pi \cdot (0,02^4 - 0,01^4)}{2} = 2,34 \times 10^{-7}$$

$$T = \frac{40 \times 10^6 \cdot 2,34 \times 10^{-7}}{0,02} = 468 \text{ Nm}$$

$$P = 2\pi fT$$

$$f = \frac{P}{2\pi T} = \frac{80 \times 10^3}{2 \pi 468} = 27,2 \text{ Hz}$$

II – Correias

As correias são os elementos mais utilizados para transmissão de potência. Elas são anéis de material flexível que movimentam em torno de dois eixos. Seu funcionamento ocorre da seguinte maneira: um eixo gira e faz com que a correia se movimente, girando o outro eixo.

As correias costumam ser utilizadas quando a transmissão é entre dois eixos que possuem uma certa distância entre si.

Existem diversos tipos de correias. Elas podem ser planas, dentadas ou trapezoidais. As planas e trapezoidais são mais utilizadas em compressores de ar-condicionado, bombas d'água e motores automotivos. Já as correias dentadas são utilizadas em conjuntos de engrenagens para transmissão de potência.

As correias planas geralmente são fabricadas em couro, borracha, lona ou mistas. As trapezoidais são fabricadas em borracha com fibras internas, pois precisam resistir mais à tração. Já as correias dentadas são fabricadas com borrachas e fibras. Elas são utilizadas em conjuntos onde não haverá deslizamentos, como a correia do alternador de um automóvel ou a correia dentada do comando de válvula.



Assimile

Para entender melhor os diferentes tipos de correias podemos ver suas características.

As correias planas podem transmitir grande quantidade de energia. Já as correias em V são as mais utilizadas nos sistemas de transmissão de potência.

As correias trapezoidais possuem custos relativamente baixos.

As correias hexagonais tendem a proteger a unidade motora.

Por fim, as correias simples e múltiplas possuem um rendimento entre 0,96 e 0,98.

Para saber qual tipo de correia utilizar consulte o Quadro 3.2 que apresenta as especificações de uso de cada tipo de correia.

Quadro 3.2 | Especificações de cada tipo de correia

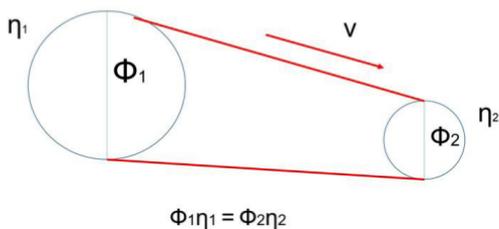
Valores máximos	Planas	Em V
Potência	1.600 kW	1.100 kW
Rotação	18.000 rpm	
Força tangencial	50 KN	
Velocidade tangencial	90 m/s	26 m/s
Distância centro a centro	12 m	
Relação de transmissão ideal	1:5	1:8
Relação máxima de transmissão	1:10	1:15

Fonte: elaborado pela autora.

III – Polias

As polias formam um par cinemático. Elas são unidas por uma correia, que é um elemento flexível. As polias são de aço, alumínio ou madeira. A Figura 3.2, a seguir, mostra como é realizada a transmissão por polias.

Figura 3.2 | Transmissão por polias



Fonte: elaboradora pela autora.

IV – Engrenagens

As engrenagens são elementos classificados pela sua forma construtiva, que define, com isso, a sua aplicação. Existem engrenagens cilíndricas, helicoidais, cônicas e tipo parafuso sem-fim.



Pesquise mais

Para conhecer um pouco mais de dimensionamento de engrenagens, você pode consultar a apostila sobre engrenagens da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Essa apostila traz em detalhes como fazer um dimensionamento de engrenagens.

SANTOS JR., A. A. **Engrenagens cilíndricas de dentes retos**. Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, 2003.

TRANSMISSÃO POR ATRITO

Esse sistema de transmissão é muito parecido com a transmissão por engrenagens. Há semelhança com o espaço, com os tipos e arranjos entre árvores e sentido de rotação. Porém neste tipo de sistema a transmissão é realizada por deslizamento, como a transmissão que utiliza o elemento de máquina correias. Esse deslizamento ocorre em função do torque transmitido e pela pressão de contato. Esse mecanismo não é muito utilizado, sendo recomendado para velocidades tangenciais de até 20 m/s e de eficiência entre 95 a 98%.

Um exemplo desse tipo de transmissão é a embreagem de fricção. Ela utiliza o princípio de atrito entre dois discos e com isso transmite a rotação para as rodas.

CÁLCULO CINÉTICO E CINEMÁTICO

O cálculo cinemático relaciona com as características do movimento, de uma perspectiva espacial e temporal, sem referência com a força causadora do movimento. Ou seja, descreve o movimento para determinar qual a velocidade do objeto e qual a altura e a distância que o objeto atinge. Logo, um par cinemático é composto de dois elementos ligados entre si, podendo a vinculação entre eles ser:

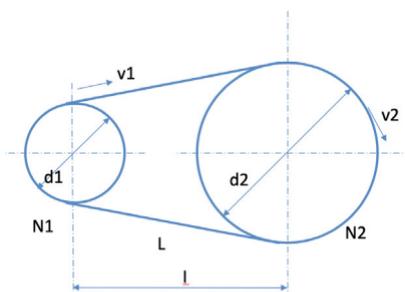
- Um ponto: por exemplo, o dente de engrenamento das engrenagens.
- Um elemento flexível: por exemplo, as correias.
- Uma articulação: por exemplo, a rótula entre a biela e a manivela, que é o mancal.
- Um deslizamento: por exemplo, o êmbolo de um pistão e sua camisa.

O cálculo cinético examina as forças que agem sobre um sistema. Ele define as forças que provocam o movimento. Por meio dessa análise é possível avaliar as características do movimento de uma carga. Logo, a cadeia cinemática ou sistema é composta do conjunto dos vários elementos ligados entre si.

Resumindo, a análise cinemática verifica as características dos movimentos do objeto, características físicas e o tempo, enquanto a análise cinética verifica as forças que são necessárias para que os movimentos sejam executados.

Conforme Figura 3.3, é possível calcular a relação de transmissão pela análise cinemática do mecanismo.

Figura 3.3 | Relação de transmissão



Fonte: elaboradora pela autora.

Na transmissão por polia as velocidades dos dois eixos são iguais, logo temos:

$$v_1 = v_2$$

$$\pi d_1 \times n_1 = \pi d_2 \times n_2$$

$$d_1 \times n_1 = d_2 \times n_2$$

Logo,

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}$$



Exemplificando

Por exemplo, um motor que possua uma polia de 150 mm de diâmetro que gire a 750 rpm para mover um eixo de transmissão, cuja polia tenha 300 mm de diâmetro, apresenta a seguinte rotação do eixo.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}$$

$$d_1 = 150mm$$

$$d_2 = 300mm$$

$$n_1 = 750rpm$$

Logo:

$$n_2 = \frac{d_1 \times n_1}{d_2} = \frac{150 \times 750}{300} = 375rpm$$

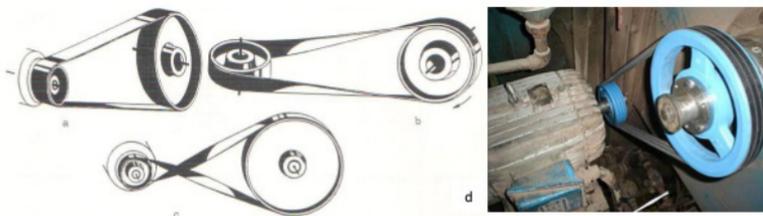
O eixo possui uma rotação de 375 rpm.

Chegamos no momento de abordar o aspecto importante de nossas discussões, ou seja, vamos tratar sobre a avaliação das forças de atrito e contato?

A transmissão de potência é a transmissão de força e velocidade de um eixo a outro. Essa transmissão é realizada por mecanismo, como já visto. Esses mecanismos podem ser classificados em classes e gêneros.

1. Transmissão por contato direto. Essa transmissão acopla uma fonte de potência à máquina a ser movida de forma direta. Esse tipo de transmissão pode ser realizado por correias. Nesse caso, o movimento se caracteriza por ser no mesmo sentido entre a polia motora e a movida, como visto na figura a seguir.

Figura 3.4 | Transmissão por contato direto



Fonte: <https://goo.gl/vUdWeK>. Acesso em: 12 fev. 2019.

Essas transmissões são de simples construção e também são silenciosas. Elas têm capacidade de absorver choques e, como todas as transmissões, geram algumas perdas por atritos. Essas perdas são representadas pelo rendimento da transmissão ou eficiência (E_f).

2. Transmissão por contato indireto. São os intermediários rígidos, ou seja, biela e eixo cardan ou intermediários flexíveis, isto é, correias, cabos e correntes.

Bom, agora você já é capaz de começar a resolver o problema do equipamento de implemento agrícola.

Sem medo de errar

Vamos retomar a situação-problema proposta no início da seção. Você como projetista precisa escolher que tipo de transmissão irá utilizar nos equipamentos da empresa. Continuando com a mesma situação da empresa de implementos agrícolas. Sabe-se que o motor desse equipamento apresenta um torque de 40 kgf.m e uma rotação máxima de 2.400 rpm.

Qual será o melhor sistema de transmissão para esse tipo de equipamento? Além disso, qual é a potência que será transmitida? Quais são as especificações dos elementos de transmissão?

Qual tipo de transmissão deve ser utilizado por força de atrito e de contato?

O primeiro passo é calcular a potência necessária, a fim de saber qual elemento escolher.

$$P(W) = T(Nm) \times \omega(rad / s)$$

$$T = 40kgfm = 40 \times 9,8 = 392Nm$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60.000} = \frac{2\pi \times 2.400}{60.000} = 0,25rad / s$$

$$P = 392 \times 0,25 = 98kW$$

Com os dados disponíveis, podemos escolher qualquer um dos elementos apresentados anteriormente, logo, neste caso foi escolhida a **transmissão por correias**, já que são as mais utilizadas. Como escolhemos a correia para esse sistema, teremos um sistema de **transmissão por força de atrito**, onde a transmissão é realizada por **deslizamento**.

Se o eixo for tubular e possuir um diâmetro externo de 40 mm e um diâmetro interno de 20 mm, calculamos também a tensão de cisalhamento e a frequência.

$$J = \frac{\pi(R_0^4 - R_i^4)}{2}, \text{ para eixo tubular e } T = \frac{\tau_{adm} \times J}{R}$$

$$J = \frac{\pi(0,02^4 - 0,01^4)}{2} = 2,34 \times 10^{-7} m^4 \text{ e } 392 = \frac{\tau_{adm} \times 2,34 \times 10^{-7}}{0,02}$$

$$\tau_{adm} = 33.504.273Pa = 33,5MPa$$

$$f = \frac{P}{2\pi T} = \frac{98 \times 10^3}{2\pi \times 392} = 39,8Hz$$

Outro ponto importante a ser considerado é o rendimento dessa transmissão. Como foi escolhida a correia, temos que o rendimento ficará entre $0,97 \leq \eta_c \leq 0,98$, conforme Quadro 3.1. Logo, a potência efetiva ficará entre 95,06 W e 96,04 W obtido de (98 x 0,97 ; 98 x 0,98).

Motor de um carro compacto

Descrição da situação-problema

Agora vamos considerar a seguinte situação. Durante o desenvolvimento de um motor de um carro compacto 1.0 flex de três cilindros, é necessário realizar alguns cálculos a fim de que a frequência do motor seja conhecida. Esse motor consegue desenvolver uma potência de 128 cavalos a 5.500 rpm. Qual seria o torque, a tensão máxima de cisalhamento e a frequência desse motor se o seu eixo for maciço de 25 mm de diâmetro.

Resolução da situação-problema

Podemos começar calculando o torque.

$$P(W) = T(Nm) \times \omega(\text{rad} / s)$$

Para transformar a potência de W, temos que 1 cv é igual a 0,735499 kW. Logo,

$$128 \times 0,735499 = \frac{T \times 2\pi \times 5.500}{60.000}$$

$$T = 163,5 Nm$$

O próximo passo é calcular a tensão máxima de cisalhamento.

$$T = \frac{\tau_{adm} \times J}{R}$$

$$J = \frac{\pi R^4}{2}, \text{ para eixo maciço}$$

$$J = \frac{\pi \times 0,0125^4}{2} = 3,83 \times 10^{-8}$$

$$163,5 = \frac{\tau_{adm} \times 3,83 \times 10^{-8}}{0,0125} = 53.292.714 Pa = 53,3 MPa$$

Por último, calculamos a frequência do motor.

$$f = \frac{P}{2\pi T} = \frac{128 \times 0,735499 \times 10^3}{2\pi \times 163,5} = 91,6 Hz$$

1. As correias possuem algumas características. Essas características é que ajudam na definição do tipo de correia a ser utilizada.

Acerca das correias, analise as afirmativas a seguir:

I – Elas não podem transmitir grande quantidade de energia.

II – É uma das formas mais utilizadas em sistemas de transmissão de potência.

III – Os custos das correias são altos.

É correto o que se afirma em

- a) I, apenas.
- b) II, apenas.
- c) III, apenas.
- d) I e II, apenas.
- e) I e III, apenas.

2. Em um sistema de transmissão de potência, você como projetista considera utilizar um eixo tubular de diâmetro interno de 30 mm e diâmetro externo de 40 mm. Esse eixo gira a uma velocidade angular de 10π rad/s.

Qual o período (t) e a frequência (f), respectivamente.

- a) 0,2 s e 5 Hz.
- b) 5 s e 0,2 Hz.
- c) 0,1 s e 10 Hz.
- d) 10 s e 0,1 Hz.
- e) 0,2 s e 10 Hz.

3. Considere um sistema de transmissão de potência que utiliza um eixo tubular de diâmetro interno de 30 mm e diâmetro externo de 40 mm. Esse eixo gira a uma velocidade angular de 10π rad/s.

Esse sistema deve ter uma potência que não exceda a tensão de cisalhamento de 400 MPa.

Analise qual seria a máxima potência desse sistema.

- a) 3.436 MW
- b) 0,108 MW
- c) 108.000 MW
- d) 3,4 MW
- e) 1,08 MW

Elementos de ligação

Diálogo aberto

Caro aluno,

Na seção anterior vimos alguns elementos de transmissão de potência. Porém é importante saber como esses elementos podem ser ligados.

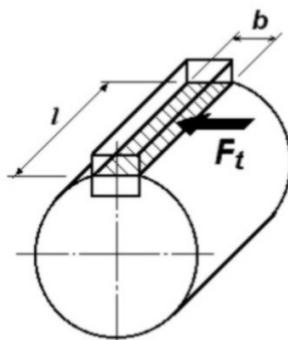
Observe que é muito importante compreender as necessidades operacionais do trabalho, para saber selecionar um acoplamento adequado para a sua indústria ou empresa. Essa análise e definição trará para as máquinas que utilizam esse elemento em suas operações um tempo de vida útil maior do que se espera, além de proporcionar custos de manutenção menor. Para escolha desses itens é importante que você tenha um projeto bem estruturado de acordo com as necessidades e resultados esperados. Outro ponto importante é a escolha do material adequado ao seu uso, as marcas oferecidas pelo mercado, se são intercambiáveis, e as formas de fabricação. Isso é válido para outros elementos também.

Nesta seção estudaremos como utilizar mais alguns elementos de máquinas em um projeto de uma máquina. Serão estudados os acoplamentos e seus tipos, bem como eixos e chavetas e as estrias. Esses elementos são considerados elementos de ligação entre os elementos de transmissão de potência.

Diante do contexto apresentado, vamos voltar ao contexto de aprendizagem.

Você se lembra que foi contratado por uma empresa de implementos agrícolas para ser o projetista? Na seção anterior você precisava dimensionar o mecanismo de transmissão e acionamento de um novo implemento agrícola. Agora você precisa dimensionar os elementos de ligação de sistema de transmissão. Vamos considerar que o eixo desse equipamento precisa de uma chaveta retangular como elemento de ligação, como a mostrada na Figura 3.5. Qual seria a força que essa chaveta precisa suportar? Qual é o tamanho, ou melhor, a área desta chaveta?

Figura 3.5 | Chaveta a ser utilizada no implemento agrícola



Fonte: <https://goo.gl/yeJUHM>. Acesso em: 18 fev. 2019.

Vamos lembrar que o motor do equipamento apresenta um torque de 40 Kgf.m e uma rotação máxima de 2.400 rpm. A tensão admissível de cisalhamento é de 33,5 Mpa e o diâmetro do eixo é de 40 mm.

Continue se aprimorando em projetos de máquinas, pois esse é um campo que necessita de muitos profissionais e aqueles bem capacitados sempre terão oportunidades.

Bons estudos!

Não pode faltar

Olá,

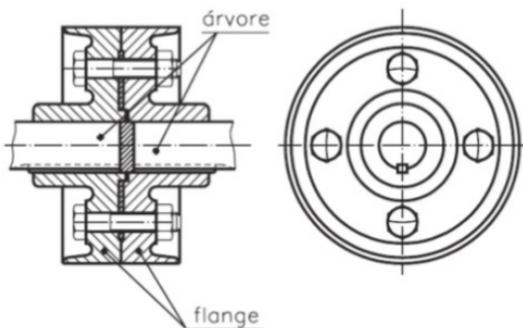
Na seção anterior vimos os sistemas de transmissão de potência e seu dimensionamento. Agora vamos apresentar os elementos de ligação desses sistemas.

Um dos elementos de ligação são os acoplamentos. Podemos definir acoplamento como um elemento mecânico utilizado para transmitir movimento de rotação entre duas árvores ou eixos-árvores (NORTON, 2013).

Eles podem ser classificados como:

- **Fixos** – Estes acoplamentos unem eixos-árvores para que funcionem como se fosse uma única peça, em que não permite movimento relativo entre eles, conforme apresentado na Figura 3.6.

Figura 3.6 | Acoplamento fixo



Fonte: <https://goo.gl/ALFYmq>. Acesso em: 4 fev. 2019.

Os acoplamentos fixos podem ser de três tipos:

- Luva de compressão: utilizados para facilitar a manutenção das máquinas, pois não interferem no posicionamento das árvores. São montados e removidos sem apresentar problemas de alinhamento.
- Rígido com flanges parafusadas: são utilizados na transmissão de altas potências em baixa velocidade.
- Discos ou pratos: são utilizados na transmissão de altas potências.

Elásticos – Estes tornam a transmissão do movimento mais suave e também permitem o funcionamento de conjuntos desalinhados paralela, angular e axialmente entre árvores. Eles são produzidos de forma articuladas, o que permite a compensação de até 6 graus de ângulo de torção e deslocamento angular axial. Os acoplamentos elásticos podem ser:

- De pinos: são de pinos de aço com mangas de borracha. A grande vantagem deste acoplamento é a facilidade de desacoplar do eixo quando se precisa remover das máquinas.
- Perflex: são discos de acoplamento unidos periféricamente por uma ligação de borracha, apertada por anéis de pressão. São utilizados, por exemplo, em bomba d'água.
- De garras: são de borracha. Estes se encaixam na abertura do contradisco e transmitem o movimento de rotação. São utilizados em aplicação em campo aberto e dispensam lubrificação.

- De fita de aço: são dois cubos de flanges ranhurados. Formam um conjunto montado em duas tampas providas de junta de encosto e de retentor elástico junto do cubo. O espaço entre os cubos é preenchido de graxa. Neste caso, apesar do acoplamento ser elástico, as árvores precisam estar bem alinhadas para não provocar vibrações excessivas.
- Dentes arqueados: podem ser utilizados para permitir até 3 graus de desalinhamento angular.
- Junta universal homocinética: são utilizadas para transmitir movimento entre árvores que precisam sofrer variação angular durante sua operação. Constituem-se de esferas de aço que se alojam em calhas.

Há um ponto importante que deve ser observado: o modo de falha em chavetas. Existem dois modos de falha em chavetas, por cisalhamento e por esmagamento. A falha por cisalhamento ocorre quando a chaveta é cisalhada ao longo de sua largura. Já a falha por esmagamento ocorre em qualquer lado em compressão (NORTON, 2013).

- **Móveis** – Estes acoplamentos são utilizados para permitir o jogo longitudinal das árvores. Eles transmitem força e movimento só quando acionados. Podem ser de garras ou de dentes. O acoplamento acontece por meio de encaixe das garras ou dentes.

A montagem dos acoplamentos deve ser realizada com alguns cuidados. Precisa-se colocar os flanges a quente, sempre que possível. Isso evita a montagem por meio de golpes. Outro ponto é o alinhamento das árvores que deve ser o melhor possível. Mesmo na montagem dos acoplamentos elásticos, o alinhamento deve ser observado.

Na montagem deve verificar a folga entre os flanges, bem como o alinhamento e a concentricidade do flange com a árvore.

Os acoplamentos necessitam de lubrificação. O melhor procedimento de lubrificação é o recomendado pelo fabricante da máquina. Porém existem algumas características de devem ser observadas.

A primeira característica é o ponto de gota que deve ser de 1500C ou mais. A segunda característica é a respeito da consistência, a qual deve ser

NLGI no 2 (*National Lubricating Grease Institute*) com valor de penetração de 250 a 300. Deve ter baixo valor de separação do óleo e alta resistência à separação por centrifugação. Além disso, deve possuir qualidades lubrificantes equivalentes às qualidades dos óleos minerais bem refinados de alta qualidade e não deve corroer aço ou deteriorar neoprene.

Conforme Collins (2006), o projeto de um acoplamento rígido envolve normalmente uma investigação das seguintes áreas críticas potenciais:

1. Cortante e esmagamento da chaveta.
2. Cortante e esmagamento dos parafusos de fixação, incluindo a influência da pré-carga e/ou da flexão dos parafusos do flange, se aplicável.
3. Esmagamento do flange nas interfaces de fixação dos parafusos.
4. Cortante no cubo do flange.



Exemplificando

No setor fabril os acoplamentos ganham importância, pois estão diretamente ligados ao bom desempenho dos mais variados tipos de máquinas e equipamentos. Os primeiros acoplamentos utilizados pelas indústrias eram apenas juntas universais, compostas basicamente por terminais, cruzetas e rolamentos. Com o passar do tempo esse conjunto deu origem aos cardans. O acoplamento do tipo pneu surgiu nos anos 70. Atualmente a necessidade é que esses acoplamentos durem cada vez mais e tenham uma maior capacidade de transmissão de torque, e que utilizem cada vez menos espaço. Qualquer aplicação que tenha um acionamento rotativo pode ter a presença de um acoplamento.

Os acoplamentos são utilizados em transportadores de correia, bombas centrífugas, agitadores, misturadores, trituradores, compressores, elevadores de caneca, extrusoras, geradores, moinhos, sopradores e ventiladores. São utilizados em diversos ramos industriais, como: mineração, siderurgia, sucroalcooleiro, petróleo e gás, alimentício e metalurgia.

Agora vamos aprender um pouco mais sobre os eixos.

Os eixos são elementos de máquinas que servem para apoiar peças de máquinas que podem ser fixadas a eles ou serem móveis. Existem dois tipos

de eixos, os fixos e os móveis. Como já vimos, os eixos não transmitem momento de torção e são solicitados principalmente à flexão. Outra classificação dos eixos é quanto ao tamanho, pois se eles forem curtos são chamados de pinos (COLLINS, 2006).

Não podemos confundir também o eixo com o eixo-árvore. O eixo-árvore transmite momento de torção, ou seja, podem ser solicitados a torção ou flexão.

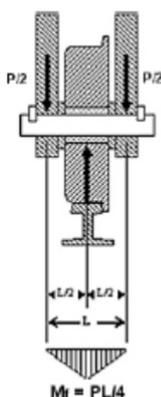
Os eixos podem ser fabricados em aço carbono, aço ao Ni e Cr, aço ao Cr ou aço Ni-Cr-Mo.

Para dimensionamento dos eixos precisa verificar quando em trabalho a que forças eles estão sujeitos. As principais são:

- Flexão Simples

No dimensionamento pela flexão simples, deve-se calcular a seção do eixo para resistir a máxima tensão de flexão. Para um eixo de seção homogênea, a tensão de flexão será a máxima onde for máximo o momento fletor, como mostra a Figura 3.7.

Figura 3.7 | Eixo de flexão simples



Fonte: <https://goo.gl/4LBs5P>. Acesso em: 4 fev. 2019.

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_f}, \text{ onde:}$$

σ_f = Tensão de flexão

M_f = Momento de Flexão

W_f = Módulo de resistência a flexão

- Torção simples

A tensão de torção em uma determinada seção do eixo será:

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_t}, \text{ onde:}$$

τ_t = Tensão de torção

M_t = Momento de torção

W_t = Módulo de resistência à torção

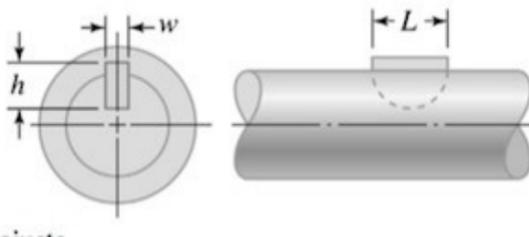
Na equação, o valor das tensões de flexão e torção deve ser limitado a tensão admissível do material.

- Flexão-torção

Para eixos submetidos a cargas devem ser calculados considerando a fadiga. Neste caso os eixos devem ter bom acabamento, ou seja, devem ser retificados. Rasgos de chavetas, canais, furos, etc. introduzem concentrações de tensão que devem ser considerados na avaliação do coeficiente de segurança.

As chavetas são elementos de máquinas fabricadas em aço. Sua forma é retangular ou semicircular. Elas se interpõem em uma cavidade de um eixo e de uma peça. A Figura 3.8 apresenta a chaveta.

Figura 3.8 | Chaveta



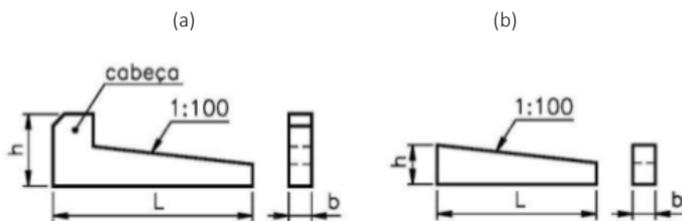
Fonte: Collins (2006, p. 307).

A finalidade de se utilizar a chaveta é ligar dois elementos mecânicos.

As chavetas possuem a seguinte classificação (NORTON, 2013):

- Chavetas de cunha: podem ser subdivididas em:
 - Chavetas longitudinais: estas chavetas são colocadas na extensão do eixo para unir roldanas, rodas, volantes, etc. Elas podem ser com ou sem cabeça, conforme mostrado na Figura 3.9 a e b, respectivamente.

Figura 3.9 | (a) Chaveta com cabeça e (b) chaveta sem cabeça



Fonte: <https://goo.gl/QuWjq9>. Acesso em: 4 fev. 2019.

Esse tipo de chaveta tem montagem e desmontagem fáceis. As chavetas longitudinais podem ser:

- Encaixadas: possuem forma do tipo mais simples de chaveta de cunha. Seu rasgo do eixo é sempre mais comprido que a chaveta.
- Meia-cana: estas chavetas possuem base côncava, ou seja, com o mesmo raio do eixo. Sua inclinação é de 1:100 e podem ser com ou sem cabeça. Neste caso, não é necessário rasgo na árvore, pois ela transmite o movimento por atrito.
- Planas: são similares à chaveta encaixada. A diferença é na montagem, pois nas chavetas planas não se abre o rasgo no eixo.
- Embutidas: esta chaveta tem os extremos arredondados. O rasgo para alojamento da chaveta no eixo possui o mesmo comprimento da chaveta. Logo, elas são embutidas e não têm cabeça.
- Tangenciais: são chavetas formadas por um par de cunhas colocado em cada rasgo. Nestes casos, são utilizadas duas chavetas que transmitem fortes cargas. Estas são utilizadas quando o eixo está submetido à mudança de carga ou golpes.
- Chavetas transversais: estas chavetas são utilizadas em união de peças que transmitem movimentos rotativos e retilíneos alternativos. Elas podem ser simples ou duplas. As simples possuem inclinação apenas de um lado, já as duplas possuem inclinação dos dois lados. As chavetas transversais podem ser tipo woodruff, as quais são utilizadas em eixos cônicos por

facilitar a montagem e se adaptar à conicidade do fundo do rasgo do elemento externo.

- Chavetas paralelas: também chamadas de linguetas. Elas possuem as faces paralelas e não têm inclinação. A tolerância deste tipo de chaveta pode ser por ajuste forçado, cuja montagem é fixa, por deslizante justo, cuja montagem é justa ou por deslizante livre, cujas peças são móveis.
- Chavetas de disco: esta chaveta é uma variante da chaveta paralela. É utilizada em eixo cônico, pois facilita a montagem.

No projeto das chavetas há poucas variáveis a serem dimensionadas. O diâmetro do eixo já determina a largura da chaveta. A altura é determinada pela largura. Logo, o cálculo é apenas do comprimento da chaveta.

O projeto de chaveta para uma dada aplicação deve assegurar que o torque de operação seja transmitido sem falha, enquanto torques gerados por condições de sobrecargas, tais como o emperamento ou o engripamento de um componente do sistema, causem o cisalhamento da gaveta na interface eixo-cubo. (COLLINS, 2006, p. 307).



Assimile

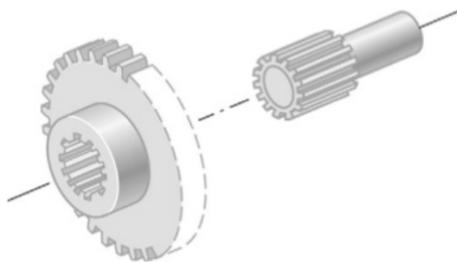
Normalmente as chavetas são fabricadas em aço carbono SAE 1045, aço inox ANSI 304, 316, 420 e tratadas ou não termicamente. São utilizadas para criar vínculo entre engrenagens, polias ou volantes ao eixo.

A chaveta é uma peça de um mecanismo que serve como trava de outras peças para que entre eixos e polias, ou eixos e engrenagens haja rotação síncrona. Ela tem a forma de um prisma de base retangular ou trapezoidal condizente à ranhura feita nos outros componentes.

As chavetas não possuem inclinação, suas faces são paralelas e devem ser perfeitamente ajustadas às laterais do rasgo da chaveta para, dessa forma, permitir transmissão de movimento.

Por fim, veremos as estrias. Estrias é um conjunto de várias chavetas que se encaixa em um cubo que também é ranhurado, conforme Figura 3.10. Elas são utilizadas quando se necessita transmitir mais torque do que a chaveta suporta. As estrias podem ser de seção transversal quadrada ou de involuta.

Figura 3.10 | Estrias



Fonte: Collins (2006, p. 312).

As estrias podem possuir dois tipos de perfil (NORTON, 2013):

- Perfil de lados retos e paralelos: estes perfis são paralelos ao eixo de simetria e apresentam uma série de ranhuras longitudinais em torno da sua circunferência. Essas ranhuras engrenam-se com os sulcos correspondentes de peças que serão montadas no eixo. A característica principal é transmitir grande força.
- Perfil evolvente.

As principais vantagens deste tipo de estria são:

- A maior capacidade de carga.
- A concentração de tensões bem mais reduzidas.
- A centragem mais perfeita, pois tem tendência ao autoalinhamento resultante da sua construção.
- Possibilidade de execução em máquinas de grande produção e alta precisão.

A SAE considera que 25% dos dentes estão em contato, logo pode-se calcular o comprimento da parte estriada com a equação a seguir:

$$l = \frac{d_r^3(1 - d_i^4/d_r^4)}{d_p^2} \quad , \text{ onde:}$$

l = comprimento

dr = diâmetro da raiz

di = diâmetro interno

dp = diâmetro primitivo

Já a área submetida ao cisalhamento é calculada pela equação:

$$A = \frac{\pi d_p l}{2}$$

A tensão de cisalhamento na estria é calculada por:

$$\tau = \frac{4F}{A} = \frac{4T}{r_p A} = \frac{8T}{d_p A} = \frac{16T}{\pi d_p^2 l}$$

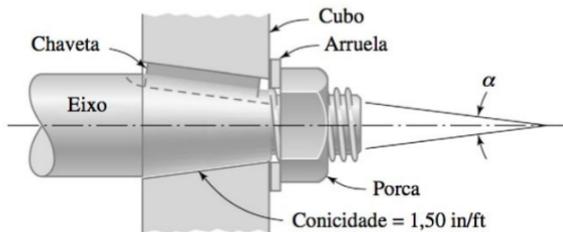
As estrias são manufaturadas no próprio eixo naturalmente, sem necessidade de rasgos para encaixes, como ocorre nas chavetas. Isso é bom pois os rasgos reduzem a capacidade do eixo de transmitir potência.

As estrias podem ser classificadas conforme o seu perfil. Elas podem ser:

- Perfil de lados paralelos: este tipo de perfil apresenta várias ranhuras longitudinais ao eixo. Este tipo de estria é utilizado para transmitir uma grande força.
- Perfil envolvental: este tipo de estria apresenta algumas vantagens sobre o perfil de lados paralelos. São elas:
 - Maior capacidade de carga.
 - Concentração de tensões reduzidas.
 - Melhor centragem.

Por fim, veremos os ajustes cônicos. Estes ajustes são usados na montagem de componentes de entrada ou de saída de potência na extremidade do eixo. Geralmente, a ponta do eixo é roscada e é utilizada uma porca para forçar o eixo o aperto axial do cone, conforme Figura 3.11.

Figura 3.11 | Ajuste cônico



Fonte: Collins (2006, p. 313).

Esses ajustes geram uma boa concentricidade, porém, a capacidade de transmissão de torque é moderada. Para aumentar essa capacidade pode acrescentar uma chaveta de conexão cônica. Os cones típicos que são utilizados nessas conexões são autotravantes, com isso, o projetista pode fornecer os meios para inserir ou fixar um “extrator” que facilite a desmontagem da junta cônica se necessário.

Em alguns casos o ajuste é por interferência, que pode ser gerado pressionando axialmente ao eixo de um componente com o furo do cubo ligeiramente menor que o diâmetro de montagem do eixo.

Feitas as considerações acerca do tema da aula, agora você está preparado para as próximas etapas deste material, vamos resolver a situação problema proposta.

Sem medo de errar

Vamos retomar a situação problema proposta. Como projetista você precisa escolher o elemento de ligação que será utilizado no sistema de transmissão do implemento agrícola que está sendo projetado.

Sabe-se que o motor desse equipamento apresenta um torque de 40 kgf.m e uma rotação de 2.400 rpm.

O primeiro passo é calcular a potência necessária para saber qual elemento escolher.

$$P(W) = T(Nm) \times \omega(rad / s)$$

$$T = 40kgfm = 40 \times 9,8 = 392Nm$$

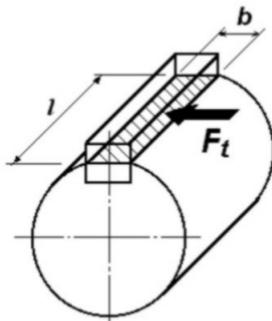
$$\omega = \frac{2\pi n}{60.000} = \frac{2\pi \times 2.400}{60.000} = 0,25rad / s$$

$$P = 392 \times 0,25 = 98kW$$

Como nesse caso será necessário transmitir torque, deverá ser utilizada a chaveta.

Vamos considerar a chaveta da Figura 3.5.

Figura 3.5 | Chaveta a ser utilizada no implemento agrícola



Fonte: <https://goo.gl/yeJUhM>. Acesso em: 18 fev. 2019.

Sabemos que a máxima tensão de cisalhamento admissível é de 33,5 MPa. Logo:

$$\tau_{adm} = \frac{F_t}{A} = \frac{F_t}{b \times l}$$
$$33,5 \times 10^6 = \frac{F_t}{b \times l}$$

A força que a chaveta sofre é dada por:

$$F_t = \frac{T}{r}$$

Como visto, o raio do eixo é de 20 mm e o torque de 392 Nm. Logo, a força é de 19.600 N.

Com isso, é possível calcular a área da chaveta que deverá ser de:

$$33,5 \times 10^6 = \frac{19,6 \times 10^3}{A}$$
$$A = 5,85 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 585 \text{ mm}^2$$

Avançando na prática

Chaveta do motor de um carro compacto

Descrição da situação-problema

Vamos considerar a seguinte situação: durante o desenvolvimento de um motor de um carro compacto 1.0 flex de três cilindros, é necessário realizar alguns cálculos a fim de que a frequência do motor seja conhecida. Esse

motor consegue desenvolver uma potência de 128 cavalos a 5.500 rpm. Qual seria a força de tensão e a área da chaveta se o seu eixo for maciço de 25 mm de diâmetro?

Resolução da situação-problema

Como já calculado na Seção 3.1, a potência será de 94,14KW. Como nesse caso será necessário transmitir torque, deverá ser utilizada a chaveta.

Sabemos que a máxima tensão de cisalhamento admissível é de 53,3 MPa e o torque é de 163,5Nm, logo, a força de tensão na chaveta será de:

$$F_t = \frac{T}{r} = \frac{163,5}{0,025} = 6,54 \times 10^3 N$$

A área da chaveta será de:

$$\tau_{adm} = \frac{F_t}{A}$$
$$53,3 \times 10^6 = \frac{6,54 \times 10^3}{A}$$
$$A = 1,23 \times 10^{-4} m^2 = 123 mm^2$$

Faça valer a pena

1. Um acoplamento precisa transmitir jogo longitudinal de eixos. Você está desenvolvendo um projeto de máquina e é preciso escolher um tipo de acoplamento para esta aplicação específica. Analise as afirmativas a seguir:

- I – Você vai utilizar um acoplamento elástico.
- II – Você pode utilizar tanto um acoplamento elástico como um móvel.
- III – O único acoplamento que pode ser utilizado é o móvel.

É correto o que se afirma em:

- a) I, apenas.
- b) II, apenas.
- c) III, apenas.
- d) I e II, apenas.
- e) I e III, apenas

2. Na montagem dos acoplamentos é necessário se ter alguns cuidados. Analise as afirmativas a seguir e marque (V) para verdadeiro e (F) para falso.

- () Colocar os flanges a quente.
- () Não há necessidade de se preocupar com alinhamento das árvores.

- () Os acoplamentos precisam de lubrificação.
- () Os acoplamentos devem ser montados por meio de golpes.

Assinale a sequência correta.

- a) V – F – F – V.
- b) F – V – V – F.
- c) V – V – V – V.
- d) V – F – V – F.
- e) F – F – F – F.

3. Um eixo possui um diâmetro de 20 mm e irá transmitir uma potência de 300W, girando em uma rotação de 1.730rpm, por meio de uma chaveta. A tensão admissível é de 60N/mm². Considerar que para eixos de 20mm a base da chaveta e sua altura devem ser de 6mm.

Qual é o comprimento dessa chaveta?

- a) 6 mm.
- b) 46 mm.
- c) 60 mm.
- d) 4,6 mm.
- e) 460 mm.

Projeto de elementos de transmissão

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção estudaremos mais alguns elementos que compõem um sistema de transmissão de potência. Serão estudadas as molas helicoidais, as correias, as correntes e os cabos de aço e eixos flexíveis.

Para atingir as competências previstas, ou seja, conhecer, compreender e ser capaz de dimensionar o sistema de transmissão de potência, você deverá trabalhar com motivação, criatividade e utilizar o seu raciocínio crítico para resolução.

Você se recorda do nosso contexto de aprendizagem? Lembre-se de que você foi contratado por uma empresa de implementos agrícolas para ser projetista, e que foi designado para o trabalho de especificar e dimensionar o mecanismo de transmissão e acionamento do novo equipamento lançado.

Até o momento, você vem desempenhando bem as atribuições que lhe foram demandadas pelo seu diretor na empresa. Nas atividades anteriores, você atendeu às demandas solicitadas considerando que o equipamento apresentava um torque de 40 Kgf.m e uma rotação máxima de 2.400 rpm.

Agora, para atingirmos os objetivos desta seção, propomos a você a seguinte situação-problema: a nova solicitação de sua diretoria é que você deverá utilizar um sistema de transmissão com correntes, para o mesmo equipamento agrícola. Para tanto, será necessário dimensionar essa corrente e as engrenagens.

Uma dúvida que seu gerente tem é se a potência será a mesma nesses dois sistemas de transmissão, ou seja, no sistema que usa correia e no que usa corrente. Logo, você precisa calcular os valores referentes às principais características desses elementos. Considere que a distância entre os eixos é de 1,5 m, a relação de transmissão é de 0,5 e que o rendimento é de 98%. A engrenagem motora para corrente tem 20 dentes e o passo é de 2.

Nesse contexto, algumas questões deverão ser respondidas, como: qual seria o número de dentes da roda dentada motora e da movida? Qual seria número de elos da corrente? A potência será a mesma em relação ao uso de correias?

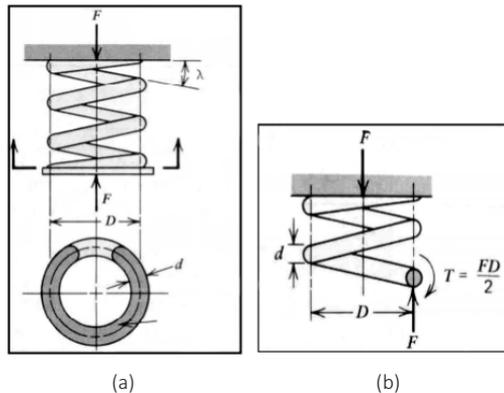
Trabalhe com criatividade e utilize o raciocínio crítico para a resolução de mais esse problema.

Bons estudos!

Nesta seção abordaremos outro elemento que faz parte dos sistemas de transmissão de potência: a mola. As molas são aplicadas para armazenamento de cargas, amortecimento de choque, distribuição de cargas, limitação de vazão, preservação de junções ou contatos. Conforme Collins (2006), as molas podem ser definidas como elementos de máquina que apresentam deformação elástica quando são carregadas e que depois recuperam a sua forma inicial, quando a carga é removida.

As molas helicoidais são as mais usadas na mecânica e geralmente são feitas com arames de aços. Elas podem ter seções retangulares, circulares ou quadradas, e podem ter formato cilíndrico, cônico ou bicônico. A Figura 3.12 apresenta a mola helicoidal.

Figura 3.12 | (a) mola helicoidal em repouso; (b) mola helicoidal comprimida



Fonte: <http://www.fem.unicamp.br/~lafer/es690/arquivos/Apostila%20Molas%201.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2019.

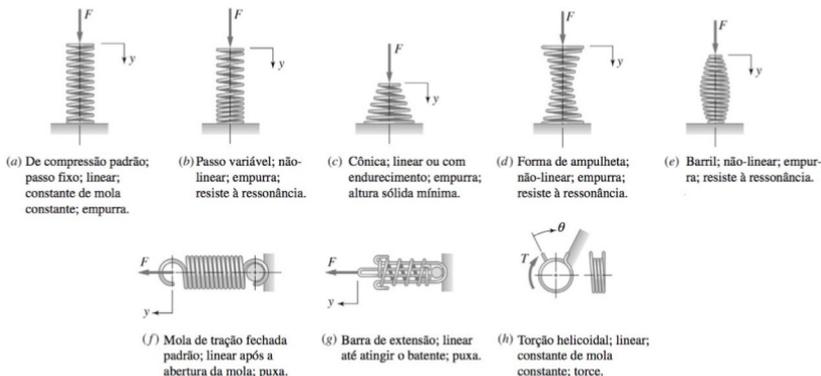
Conforme Collins (2006), as molas helicoidais podem ser dos tipos:

- **Molas helicoidais de compressão:** essas molas podem ser cilíndricas, cônicas ou bicônicas. Seu funcionamento é simples: ao aplicar uma força de compressão, os espaços entre as espiras diminuem, tornando o menor comprimento possível da mola; ao cessar a força, a mola volta ao estado de repouso. Esse tipo de mola é utilizado em furador de papéis, camas, alicates, amortecedores, entre outras aplicações.
- **Molas helicoidais de tração:** essas molas são o contrário das molas de compressão. Elas têm ganchos em suas extremidades e não existe espaço entre as espiras. Quando se aplica uma força de tração suas espiras se afastam, aumentando o comprimento da mola, e o

comprimento da mola volta ao normal em seu estado de repouso. Essas molas são utilizadas em camas elásticas, grampeadores, relógios, máquinas industriais.

- **Molas helicoidais de torção:** essas molas estão sujeitas a uma torção de extremidade. Geralmente seu enrolamento é fechado, porém com tração desprezível. Essas molas são usadas nos prendedores de roupa, impressoras, eletrodomésticos e máquinas industriais. A Figura 3.13 apresenta os vários tipos de molas.

Figura 3.13 | Tipos de molas



Fonte: Collins (2006, p. 456).

Um dos fatores importantes a ser calculado nas molas são as tensões nas molas helicoidais. A tensão máxima no fio pode ser calculada pela superposição da tensão de cisalhamento direto e da tensão de cisalhamento de torção.

A tensão é calculada de acordo com a equação a seguir:

$$\tau = \frac{8KFD}{\pi d^3} = \frac{8KFC}{\pi d^2}$$

Onde: τ = tensão de cisalhamento; D = diâmetro médio da mola; d = diâmetro do arame; F = força; C = índice de curvatura da mola $C = \frac{D}{d}$.

Para calcular os carregamentos dinâmico e estático, temos:

K_w = carregamento dinâmico (também conhecido como fator de Wahl).

K_s = carregamento estático (sem concentração de tensões).

$$K_w = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,165}{C}$$

$$K_s = 1 + \frac{0,615}{C}$$

Outro fator é a deflexão das molas. A relação de deflexão-força é facilmente obtida usando o teorema de Castigliano, conforme a equação (COLLINS, 2006):

$$U = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx$$

Onde: U = energia de deformação; M = função do momento fletor; E = módulo de elasticidade do material; I = momento de inércia.



Pesquise mais

Assista ao vídeo a seguir para saber como fazer uma simulação dinâmica em mola helicoidal:

AUTODESK Inventor - Mola Helicoidal (Simulação Dinâmica). Produção de Daniel Jose. [S.l.: s.n.], 2013. 1 vídeo (3min22s), son., color. Publicado pelo canal Daniel Jose.

A energia total de deformação para uma mola helicoidal é composta de uma componente de torção e uma componente de cisalhamento (COLLINS, 2006).

As molas com carregamento variável devem trabalhar longe da frequência natural. A frequência crítica das molas helicoidais acontece se uma extremidade de uma mola de compressão estiver fixada a uma superfície plana e a outra extremidade for perturbada, então, uma onda de compressão é criada e transmitida em vai e vem de uma extremidade até a outra. Essa frequência é calculada pela equação:

$$f = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{Kg}{W}}$$

Onde: f = frequência crítica; K = razão da mola; W = peso da mola.

Essa frequência crítica deve estar entre 15 Hz e 20 Hz, para se evitar a ressonância com os harmônicos, já que a vibração pode gerar defeito. A mola que passa por vários ciclos de operação sem falha logo deve ser projetada para uma vida infinita. Então, para melhorar a resistência à fadiga, são usados jateamento de esferas para adiar o trincamento por corrosão sob tensão.

Além disso, a resistência das molas depende do diâmetro do fio. Fios menores têm uma maior parte de sua seção transversal afetada pelo processo de estiramento, tornando-se mais resistente.



Pesquise mais

Para entender um pouco mais sobre o projeto e os cálculos de uma mola helicoidal, acesse o livro *Projeto mecânico* de elementos de máquinas (2006), em sua biblioteca virtual, e veja:

- Nas páginas de 467 a 469: um resumo do procedimento de projeto sugerido para molas helicoidais e as orientações gerais para o projeto de molas.
- Nas páginas de 469 a 471, exemplo 14.1: um projeto de molas helicoidais para cargas estáticas.

COLLINS, J. A.; BUSBY, H. R.; STAAB, G. H. **Projeto mecânico de elementos de máquinas**. [S.l.]: LTC, 2006.

Já estudamos as correias em uma seção anterior. Agora, veremos um exemplo desse elemento de máquinas para ajudá-lo a assimilar ainda mais esse assunto.



Assimile

Considere um sistema de transmissão de correia plana. Nele, a velocidade angular do eixo motor é de 3600 rpm, a potência a ser transmitida é de 0,5 HP, e a distância entre centros das polias motriz e movida é de 10 polegadas. Qual o torque dessa correia? (adaptado de Collins, 2006). O torque da correia é calculado pela fórmula a seguir:

$$P(W) = 1(HP) \times 745,7$$

$$P(W) = 0,5 \times 745,7 = 372,85W$$

$$T = \frac{60.000 \times 372,85}{2\pi \times 3.600} = 989,01Nm$$

Trataremos agora das correntes. Esse é um elemento de máquina altamente eficiente e versátil para transmitir potência. Geralmente as correntes são utilizadas nas transmissões de máquinas agrícolas e florestais. Elas são de elos estampados e fundidos, utilizadas para baixas velocidades.

Temos também as correntes de rolos, que são as correntes utilizadas em bicicletas e motocicletas. Estas são mais sofisticadas.

A transmissão por correntes só pode ser utilizada entre eixos paralelos e com rodas dentadas que estejam perfeitamente alinhadas. As velocidades das correias não ultrapassam a 20 m/s (COLLINS, 2006).

O rendimento desse tipo de transmissão fica entre 97% e 98%. As perdas acontecem principalmente pela dissipação de calor, o que exige desse tipo de transmissão cuidados com a lubrificação (COLLINS, 2006).



Pesquise mais

Para projetar e dimensionar uma transmissão por corrente, existe uma sequência de cálculos adequados. Veja um exercício resolvido desse tipo de cálculo no capítulo 14, das páginas 305 a 309 do livro *Elementos de máquinas* (2012), disponível em sua biblioteca virtual.

MELCONIAN, S. **Elementos de máquinas**. 10. ed. São Paulo: Érica, 2012.

A relação cinemática das correntes são as mesmas das correias, conforme equação a seguir:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Onde: N = rotação; Z = número de dentes da roda dentadas; T = torque.

O comprimento da corrente refere-se ao número de elos definido na equação:

$$n = \frac{2l}{p} + \frac{Z_1 + Z_2}{2} + \left(\frac{Z_2 - Z_1}{2\pi} \right)^2 \frac{p}{l}$$

Onde: n = número de elos da corrente; Z = número de dentes das rodas dentadas; p = passo das rodas e da corrente; l = distância entre centros das árvores.



Exemplificando

Uma transmissão por meio de corrente entre um motor estacionário e um picador tem torque de 15 N.m. A rotação em que esse motor trabalha é de 1.500 rpm. O número de dentes da roda dentada motora é de 15, e da movida é de 35. O rendimento estimado é de 98%. O passo da corrente e das rodas dentadas é de 12,7 mm. A distância entre os eixos é de 1,0 m. Qual será a potência disponível no eixo do picador?

Resolvendo, temos:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{T_1 Z_2}{Z_1} = \frac{15Nm \times 35}{15} \times 0,98 = 34,3Nm$$

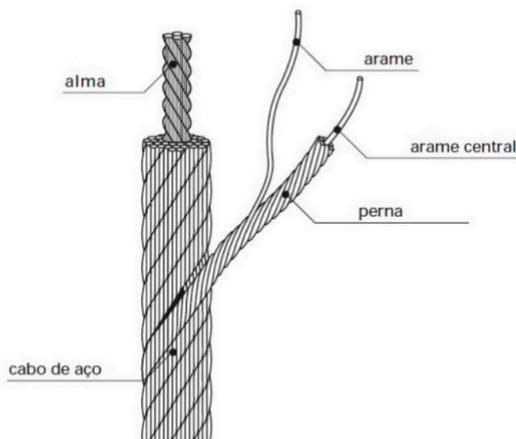
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$N_2 = \frac{N_1 Z_1}{Z_2} = \frac{1.500rpm \times 15}{35} = 642,9rpm$$

$$P_2 = 2\pi N_2 T_2 = \frac{2 \times \pi \times 642,9 \times 34,3}{60} = 2.309W$$

Os cabos de aço são elementos de transmissão que suportam cargas e fazem o deslocamento nas posições horizontais, verticais ou inclinadas. Os cabos de aço são construídos conforme apresentado na Figura 3.14.

Figura 3.14 | Composição dos cabos de aço



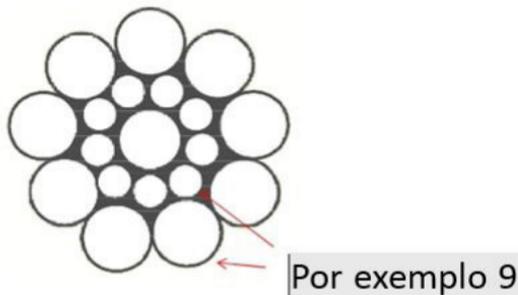
Fonte: adaptada de <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAQtEAH/prominp-3?part=6>. Acesso em: 27 fev. 2019.

A perna, conforme mostrada na Figura 3.14, é composta de duas camadas: a primeira é o arame central composto de um fio; e a segunda é o arame composto de seis fios. Todos os arames têm o mesmo diâmetro.

Os cabos podem ter uma composição Seale, apresentando pelo menos duas camadas adjacentes com o mesmo número de arames. Porém, a camada

externa tem arames com diâmetro maior para aumentar a resistência ao desgaste, conforme mostra a Figura 3.15.

Figura 3.15 | Composição Seale dos cabos de aço



Fonte: adaptada de <http://www.cabema.com.br/imagens/informacoes/cabo-aco-preco-02.jpg>. Acesso em: 27 fev. 2019.

Além da composição Seale, há mais dois tipos de composição (COLLINS, 2006):

- Composição Filler, onde o cabo tem arames muito finos entre as duas camadas. A vantagem desse tipo de composição é aumentar a área de contato, a flexibilidade, a resistência ao amassamento e redução do desgaste entre os arames.
- Composição Warrington, onde existe pelo menos uma camada constituída de arames de dois diâmetros diferentes e alternados. A vantagem dessa composição é a boa resistência ao desgaste e à fadiga.

Outra parte do cabo é a alma. A alma é o núcleo em torno do qual as pernas são torcidas e ficam dispostas em forma de hélice (COLLINS, 2006). Sua principal função é fazer com que as pernas sejam posicionadas de tal forma que o esforço aplicado no cabo de aço seja distribuído uniformemente entre elas. A alma pode ser feita em fibra natural ou artificial, ou ainda ser formada por perna ou cabo de aço independente.

A fibra natural mais utilizada é o sisal ou rami, porém pode ser algodão ou asbesto. Já a fibra artificial mais usada é o polipropileno. Esta é utilizada para cargas leves. As vantagens da fibra artificial é que dá mais flexibilidade, não se deteriora em contato com agentes agressivos e não absorve umidade. Porém, também tem desvantagens, pois é mais cara e só é utilizada em cabos especiais.

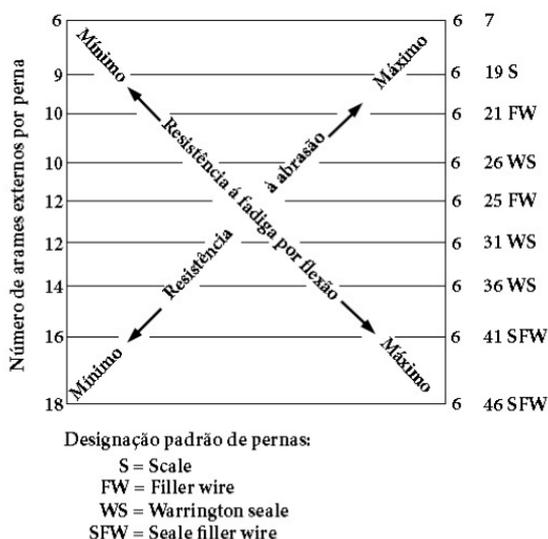
Existe também a alma do aço, ou seja, a alma formada pela perna do próprio cabo de aço.

A alma também pode ser fabricada com aços especiais, de alta resistência. Nesse caso são usadas para cargas mais pesadas, pois oferecem maior resistência ao amassamento e à tração.

Para se escolher o cabo adequado, deve-se seguir os seguintes passos:

1. Estabelecer as especificações do projeto.
2. Selecionar por tentativa a construção do cabo interpretando a Figura 3.14. Também é necessário selecionar o material do cabo.
3. Calcular a bitola do cabo preliminar.
4. Utilizar a bitola para determinar o diâmetro mínimo da polia.
5. Estimar a tensão de flexão dos arames.

Figura 3.16 | Gráfico para seleção de cabos



Fonte: Collins (2006, p. 650).



Refleta

É muito importante que os cabos sejam inspecionados e substituídos caso apresentem algum problema.

A inspeção de um cabo considera vários fatores, dentre eles o estado do arame, o desgaste externo e a corrosão.

Pesquise e reflita: por que a corrosão é um fator tão importante de se inspecionar? Em que ela afeta?

Os cabos de aço, como as correntes, devem ser lubrificados. Isso é necessário para proteger o cabo contra a corrosão e também para reduzir o desgaste por atrito.

As características de um bom lubrificante para os cabos são (COLLINS, 2006):

- Ser quimicamente neutro.
- Ter boa aderência.
- Ter viscosidade capaz de penetrar entre as pernas e outros arames.
- Ser estável sob condições operacionais.
- Proteger contra a corrosão.
- Ser compatível com o lubrificante original.

Os cabos podem ser de dois tipos:

1. Cabos pré-formados: para fabricar esse tipo de cabo é aplicado um processo adicional onde as pernas e os arames ficam torcidos de forma helicoidal e permanecem colocados dentro do cabo na posição natural, gerando o mínimo de tensão interna.
2. Cabos não pré-formados: esse tipo de cabo tem um processo de fabricação normal.

As vantagens de se utilizar os cabos pré-formados são:

- No cabo não pré-formado, os arames e as pernas têm a tendência de se endireitar, logo a força necessária para mantê-lo em posição provoca tensão interna. As tensões internas provocam pressões entre os arames na região de contato entre as camadas e entre as pernas. Já nos cabos pré-formados, as tensões internas são mínimas, logo, o atrito e o desgaste também é mínimo.
- O manuseio é facilitado pela ausência de tensões internas.
- O equilíbrio do cabo é garantido, pois cada perna tem a mesma tensão que a outra, dividindo as cargas.
- O manuseio é mais seguro porque o cabo é isento de tensões, logo, não tem a tendência de escapar.



Assimile

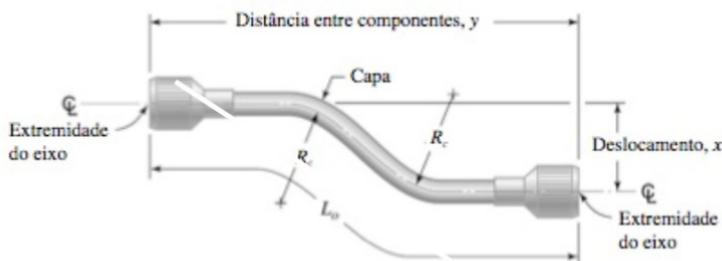
Os cabos podem apresentar deformações. Essas deformações são ocasionadas devido ao mau uso, à irregularidades no equipamento ou ainda por métodos inadequados de manuseio e fixação.

Essas deformações podem ser do tipo:

- I. Ondulações: eixo longitudinal do cabo assume forma de hélice.
- II. Amassamento: nessa situação, o cabo deve ser substituído por um com alma de aço.
- III. Gaiola de passarinho: acontece em cabo de aço com alma de aço quando ocorre um alívio repentino da tensão.
- IV. Alma saltada: também é causada pelo alívio repentino da tensão.
- V. Dobra ou nó: descontinuidade no sentido longitudinal do cabo.

Por fim, os eixos flexíveis são eixos utilizados quando ocorre problemas de desalinhamento ou quando há a necessidade de grandes deslocamentos entre dois eixos rotativos, conforme mostrado na Figura 3.17. Os eixos flexíveis são construídos com uma quantidade de 1 a 12 camadas de arames curvados em forma de hélice. Normalmente o arame utilizado para aplicações de transmissão de potência é de aço carbono com tratamento térmico e alívio de tensões.

Figura 3.17 | Eixo flexível



Fonte: Collins (2006, p. 656).

Algumas fórmulas são importantes para dimensionar um eixo flexível. O torque (T) é dado por:

$$T = \frac{63025(HP)}{n}$$

Onde: T = torque ($lbf \cdot in$); n = velocidade angular (rpm); HP = potência (HP).

O raio de curvatura (R_c) é calculado com: $R_c = \frac{x^2 + y^2}{4x}$.

O diâmetro do eixo flexível pode ser obtido através do torque necessário e do raio de curvatura, conforme tabelas apresentadas nos Anexos 3.1 e 3.2.



Veja o material anexo a esta seção acessando o https://cm-kl-content.s3.amazonaws.com/ebook/embed/qr-code/2019-1/projeto_maquinas/u3/s3/pro_maq_u3_s3_QR-Code_Anexos_1pv.docx ou o QR Code.

Agora você já está pronto para resolver a situação-problema.

Sem medo de errar

Retomemos a situação-problema proposta. Você foi contratado por uma empresa de implementos agrícolas para ser o projetista e foi designado a especificar e dimensionar o sistema de transmissão do implemento agrícola que está sendo projetado.

Sabe-se que o motor desse equipamento apresenta um torque de 40 kgf.m e uma rotação de 2.400 rpm.

Nas seções anteriores, você precisava dimensionar o mecanismo de transmissão e acionamento de um novo produto, bem como os elementos de ligação de sistema de transmissão.

Como vimos, o motor do equipamento apresenta um torque de 40 Kgf.m e uma rotação máxima de 2.400 rpm.

Agora, calcularemos a situação seguinte. Na Seção 3.1 utilizamos um sistema de transmissão por correias. Nesta seção, utilizaremos uma corrente para transmitir potência. Logo, é necessário dimensioná-la. Precisamos definir qual seria o número de dentes da roda dentada motora e da movida que são ligadas à corrente. Outro ponto importante de dimensionar é o número de elos da corrente.

Uma dúvida que seu gerente tem é se a potência será a mesma nesses dois sistemas de transmissão, ou seja, no sistema que usa correia e no que usa corrente. Para ajudá-lo com essa dúvida, você precisa calcular. Consideremos os seguintes dados para dimensionar a corrente: a distância entre os eixos é de 1,5 m, a relação de transmissão é de 0,5 e o rendimento é de 98%. A corrente motora tem 20 dentes e o passo é de 2.

A respeito da pergunta sobre a potência, temos que a roda dentada motora tem uma potência de 98 kW, como calculado na Seção 3.1. Já a potência da roda movida é de:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2} = 0,5$$

já que a relação de transmissão é de 0,5.

Com isso, a potência será:

$$\frac{N_2}{N_1} = 0,5$$

$$N_2 = 0,5 \times 2.400 = 1.200 \text{rpm}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = 0,5$$

$$T_2 = \frac{392}{0,5} = 784 \text{Nm}$$

$$P_2 = 2\pi N_2 T_2 = \frac{2 \times \pi \times 1.200 \times 784}{60} = 98 \text{kW}$$

Com isso, respondemos à primeira pergunta: a potência é a mesma.

Agora, calcularemos o número de elos da corrente, utilizando a fórmula:

$$n = \frac{2l}{p} + \frac{Z_1 + Z_2}{2} + \left(\frac{Z_2 - Z_1}{2\pi} \right)^2 \frac{p}{l}$$

Sabemos que:

$$Z_1 = 0,5Z_2$$

Como $Z_1 = 20$ dentes, então $Z_2 = 40$ dentes. Com isso, respondemos a mais uma pergunta.

$$\begin{aligned} n &= \frac{2l}{p} + \frac{Z_1 + Z_2}{2} + \left(\frac{Z_2 - Z_1}{2\pi} \right)^2 \frac{p}{l} \\ n &= \frac{2 \times 1,5}{2} + \frac{20 + 40}{2} + \left(\frac{40 - 20}{2\pi} \right)^2 \times \frac{2}{1,5} = \\ n &= 1,5 + 30 + 10,13 \times 1,33 = 45 \end{aligned}$$

O número de elos dessa corrente é de 45.

Avançando na prática

Descrição da situação-problema

Acompanhemos mais uma situação. Durante o desenvolvimento de um motor de um carro compacto 1.0 flex de três cilindros, é necessário realizar alguns cálculos a fim de se conhecer a frequência do motor. Esse motor

consegue desenvolver uma potência de 128 cavalos a vapor a 5.500 rpm.

Além de conhecer a frequência desse motor, sabemos que a transmissão é feita por corrente dentada. Logo, precisamos dimensioná-la. Precisamos saber o torque, o número de dentes e o número de elos.

A seguir, calcularemos o número de dentes da roda dentada movida, o número de elos da corrente e o torque. Considere a relação de transmissão de 0,4, a roda motora com 20 dentes, a distância entre eixos de 1,0 m e o passo de 4.

Resolução da situação-problema

O primeiro passo é calcular o torque da roda motora.

$$P_1 = 2\pi N_1 T_1$$

$$T_1 = \frac{P_1}{2\pi N_1} = \frac{128 \times 0,735499 \times 60.000}{2 \times \pi \times 5.500} = 163,5 Nm$$

Já o torque da roda movida será:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = 0,4$$

$$T_2 = \frac{163,5}{0,4} = 408,75 Nm$$

O número de dentes da roda movida será de:

$$Z_1 = 0,4 Z_2$$

$$Z_2 = \frac{20}{0,4} = 50 \text{ dentes}$$

A última coisa a ser calculada é o número de elos:

$$n = \frac{2l}{p} + \frac{Z_1 + Z_2}{2} + \left(\frac{Z_2 - Z_1}{2\pi} \right)^2 \frac{p}{l}$$

$$n = \frac{2 \times 1,0}{4} + \frac{20 + 50}{2} + \left(\frac{50 - 20}{2\pi} \right)^2 \times \frac{4}{1,0}$$

$$n = 0,5 + 35 + 22,8 \times 4 = 127$$

O número de elos dessa corrente é de 127.

1. As molas helicoidais são as mais usadas na mecânica e geralmente são feitas com arames de aços.

Agora, analise as afirmativas a seguir:

- I. As molas helicoidais de compressão são de funcionamento simples.
- II. As molas de tração têm um funcionamento contrário às de compressão.
- III. As molas de torção apresentam enrolamento fechado.

É correto o que se afirma em:

- a) I, apenas.
- b) II, apenas.
- c) III, apenas.
- d) I e II, apenas
- e) I, II e III.

2. Os cabos de aço podem ter alguns tipos de composição. Cada um apresenta uma vantagem. Se para uma aplicação é necessário que se tenha maior flexibilidade, deverá ser escolhida uma composição de cabo que atenda a essa necessidade.

As composições adequadas para essa situação são:

- a) Apenas a composição Seale.
- b) A composição Seale ou a composição Filler.
- c) Apenas a composição Warrington.
- d) Apenas a composição Filler, já que esta também tem uma área de contato maior.
- e) Todos os tipos de composição têm a mesma flexibilidade.

3. Considere uma mola com índice de mola igual a 3. Essa mola pode ter um carregamento estático, onde não há concentração de tensão ou um carregamento dinâmico.

O carregamento estático e dinâmico dessa mola são respectivamente:

- a) 1,43 e 1,21.
- b) 1,21 e 1,43.
- c) 14,3 e 12,1.
- d) 12,1 e 14,3.
- e) 12,1 e 12,1.

Referências

- COLLINS, J. A.; BUSBY, H. R.; STAAB, G. H. **Projeto mecânico de elementos de máquinas**. [S.l.]: LTC, 2006.
- MELCONIAN, S. **Elementos de máquinas**. 10. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- MOTT, R. L. **Elementos de máquinas em projetos mecânicos**. São Paulo: Pearson Brasil, 2015.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. 4. ed. [S.l.]: Bookman, 2013.

Unidade 4

Dimensionamento do sistema básico de potência

Convite ao estudo

Prezado aluno, você já deve ter percebido que o projeto de engenharia é bastante complexo e é caracterizado por ser um processo iterativo: no início, o engenheiro toma algumas decisões (umas são premissas básicas e outras são norteadoras do trabalho) e, então, inicia o desenvolvimento do projeto, especificação de componentes. No estágio inicial de concepção do projeto, é ideal que o engenheiro opte pelo caminho mais simples, para que não se chegue a um cenário no qual se gasta muito tempo durante o desenvolvimento de um produto caro em termos de custo de fabricação, montagem e manutenção. De acordo com Collins, Busby e Staab (2017):

“A simplicidade de projeto normalmente implica geometrias simples, número mínimo de componentes individuais, uso de componentes e peças padronizadas e características fáceis de alinhar na montagem, que permitam manobras de montagem em uma única direção.

No entanto, à medida que se fazem as escolhas, você se vê obrigado a fazer, ao longo do projeto, algumas alterações nas decisões iniciais. Devido a essa natureza, é fundamental que o engenheiro tenha como ferramenta o computador e softwares específicos para que ele não precise refazer todos os cálculos, todas as vezes que for necessária a alteração de determinado parâmetro de projeto. Nesta unidade, iremos passar pelas etapas de projeto, com o objetivo de projetar os principais componentes de uma máquina, aplicando os critérios de cálculo e dimensionamento para cada um dos elementos a serem definidos.

Com isso em mente, nesta unidade, você deverá se imaginar no papel de um engenheiro responsável pelo projeto de um redutor de velocidades simples com engrenagens de dentes retos para uma serra industrial que será apresentada pela empresa em uma feira internacional de máquinas e equipamentos. Essa serra receberá 25 hp do eixo do motor elétrico girando a 1800 rpm. O eixo que irá acionar a serra deverá girar a 600 rpm, aproximadamente.

Na primeira etapa de seu trabalho, que ocorrerá na primeira seção, você irá fazer a seleção dos mancais de rolamento, sendo dois para cada eixo. Importante ressaltar que a vida útil de projeto deve ser de 30000 horas, com 0,999 de confiabilidade.

Na segunda etapa do projeto, que será realizada na segunda seção, você irá projetar as engrenagens para que o equipamento atinja 30000 horas de vida útil com 0,999 de confiabilidade.

Finalmente, na terceira seção, correspondente à última etapa, você irá fazer a modelagem 3D de todos os componentes do redutor e projetar uma carcaça para proteção e sustentação de todos os itens que fazem parte do conjunto, criando animações e imagens renderizadas para que o pessoal do departamento de marketing as inclua no novo catálogo.

Você já parou para pensar em todas as variáveis envolvidas no projeto? Como é o processo de seleção de mancal de rolamento? Quais são as considerações relacionadas ao projeto de engrenagens? Quais considerações relacionadas à geometria devem ser feitas para o projeto do fechamento da máquina? O projeto parece ser bastante simples, mas precisamos nos ater a todos os detalhes para que sejam atendidas todas as especificações. Vamos em frente com nosso trabalho, pois devemos garantir uma participação excepcional da empresa na feira internacional de máquinas e equipamentos.

Bons estudos!

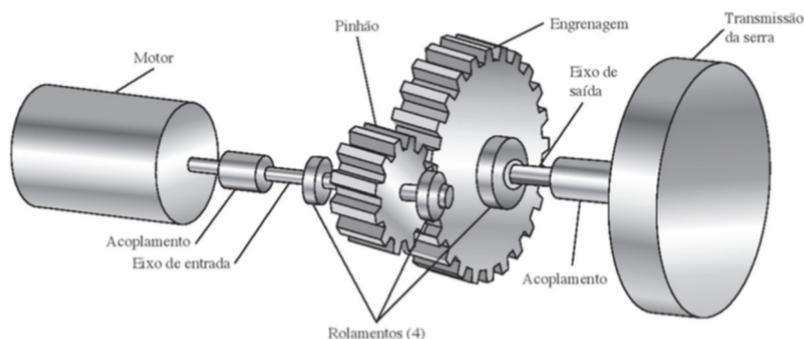
Mancais, freios e cilindros pressurizados

Diálogo aberto

Prezado aluno, durante o desenvolvimento do nosso curso, você já deve ter percebido que o projeto de máquinas é bem mais do que somente agrupar diferentes elementos de máquinas. Cada um dos elementos que compõem o sistema deve ser projetado conforme o que é preconizado pelas normas para que o funcionamento seja adequado e para que sejam atendidos os requisitos de segurança e operação especificados. Na montagem desses elementos, devemos prestar atenção aos ajustes, às interferências e à facilidade com a qual será feita a manutenção do equipamento. Dessa forma, o projetista deve pensar em componentes que possibilitem a inspeção de forma segura e sem que o conjunto inteiro precise ser desmontado, ocasionando um tempo de parada de máquina muito longo.

Imagine que você trabalha no setor de engenharia de uma empresa e é o responsável pelo projeto de um redutor de velocidades simples com engrenagens de dentes retos para uma serra industrial. Essa serra receberá 25 hp do eixo do motor elétrico girando a 1800 rpm. O eixo que irá acionar a serra deverá girar a 600 rpm, aproximadamente. Na primeira etapa de seu trabalho, você irá fazer a seleção dos mancais de rolamento, sabendo que o diâmetro do eixo de entrada, na região do rolamento, será de 25 mm e o diâmetro do eixo de saída será de 25 mm em um ponto e de 35 mm em outro. Lembre-se de que são dois mancais de rolamento para cada eixo, conforme indicado na Figura 4.1. Importante ressaltar que a vida útil de projeto deve ser de 30000 horas, com 0,999 de confiabilidade.

Figura 4.1 | Vista espacial de redutor de velocidades simples com engrenagens de dentes retos para uma serra industrial



Fonte: Mott (2015, p. 618).

Então, você deverá se atentar ao tipo de mancal de rolamento a ser utilizado. Quais as considerações de projeto? Como calcular as capacidades de carga básica? Qual parâmetro será utilizado para seleção do rolamento? Para essa seleção, é importante considerar que a primeira etapa do projeto, determinação das cargas às quais os rolamentos estão submetidos, já foi realizada anteriormente. No caso do projeto em questão, as reações de apoio em cada eixo correspondem a essas cargas, que, de acordo com o engenheiro de cálculo responsável pelo projeto do eixo, é igual a 250 lb. Vamos fazer o dimensionamento e a seleção com base nos dispositivos disponíveis no mercado! Mãos à obra, o projeto não pode parar!

Não pode faltar

Mancais são elementos de máquinas que permitem movimento relativo orientado entre dois componentes, enquanto uma carga é transmitida de um componente ao outro, sem que ocorra movimentação na direção da aplicação da força (COLLINS; BUSBY; STAAB, 2017). O mancal tem a função de, por exemplo, sustentar o eixo e cargas aplicadas a ele, ao mesmo tempo em que gira, e pode ser classificado em dois tipos: mancais de deslizamento e mancais de rolamento.

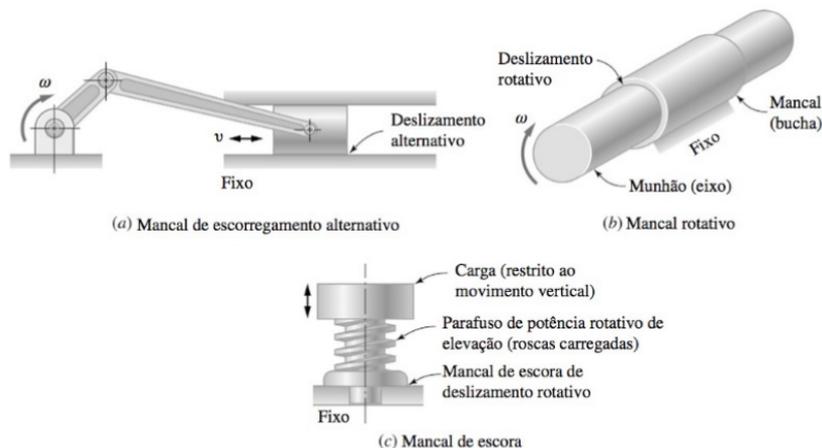


Refleta

As cargas aplicadas ao eixo são originadas de que forma? Você conseguiria dizer, neste momento, quais são as diferenças fundamentais entre mancais de deslizamento e mancais de rolamento?

Mancais de deslizamento são caracterizados pelo escorregamento de uma superfície móvel sobre outra, conforme ilustrado na Figura 4.2. Já os mancais de rolamentos apresentam as seguintes vantagens: menor custo, projeto de alojamento mais simples, menor espaço radial, operação silenciosa, resistência a sujeiras ou partículas, menor incidência de falha por fadiga e fácil reposição, além de serem relativamente leves.

Figura 4.2 | Esboços de mancais de deslizamento



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 340).

Quando ocorre um movimento relativo entre superfícies, é preciso minimizar o atrito e o desgaste. A maioria dos projetos de mancais de deslizamento prevê o uso de lubrificante para redução de atrito e da perda da potência, além de dissipar o calor produzido. É ideal que a lubrificação dos mancais de deslizamento seja feita com lubrificante limpo e isento de partículas que possam desgastar os componentes envolvidos no movimento.



Assimile

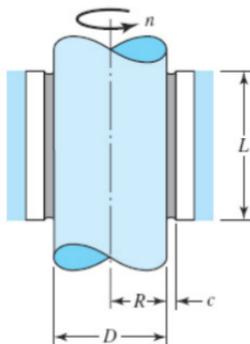
A lubrificação é geralmente classificada segundo o grau com o qual o lubrificante separa as superfícies de deslizamento. Alguns cenários são explanados a seguir, de acordo com Juvinal e Marshek (2019):

1. Lubrificação hidrodinâmica: as superfícies são completamente separadas pelo filme lubrificante. A carga é suportada pela pressão do fluido gerada pelo movimento relativo das superfícies (na rotação dos munhões). O desgaste da superfície não ocorre, e as perdas por atrito são apenas devidas ao contato com o filme lubrificante. Os valores típicos do coeficiente de atrito (f) estão na faixa de 0,002 a 0,010.

2. Lubrificação de filme misto: os picos da superfície ficam em contato de forma intermitente, e ocorre um apoio hidrodinâmico parcial. Os coeficientes de atrito geralmente ficam na faixa de 0,004 a 0,10.
3. Lubrificação limítrofe: a superfície de contato é contínua e extensiva, porém o lubrificante é continuamente “untado” nas superfícies e propicia um filme superficial adsorvido renovado continuamente, que reduz o atrito e o desgaste. Valores típicos de f estão na faixa de 0,05 a 0,20.
4. Lubrificação hidrostática: as superfícies são mantidas totalmente separadas devido à aplicação de fluido altamente pressurizado na área de carga do mancal. É uma forma de lubrificação utilizada em aplicações específicas.

Levando em consideração a lubrificação limítrofe em que se tem o filme de óleo cilíndrico como um “bloco líquido” que está sob a ação de uma força F , o torque de atrito (T_f) é obtido pela equação: $T_f = \frac{4\pi^2 \mu n L R^3}{c}$, em que μ é a viscosidade absoluta; n é a velocidade da rotação expressa em rotações por segundo; L é o comprimento do mancal; R é o raio do eixo; e c é a folga radial, obtida por $\frac{(\text{diâmetro do mancal} - \text{diâmetro do eixo})}{2}$, conforme Figura 4.3.

Figura 4.3 | Mancal de deslizamento para a análise de Petroff



Fonte: Juvinall e Marshek (2019, p. 336).

Se uma pequena carga radial W for aplicada ao eixo, o torque de atrito (T_f) será dado por:

$$T_f = fWR = f(DLP)R$$

Em que: P é a carga radial por unidade de área projetada do mancal e D , o diâmetro do eixo.

A ação da carga W fará com que o eixo fique excêntrico em relação ao mancal. No entanto, se isso for desprezível, podemos igualar ambas as equações, obtendo, desta forma, a **equação de Petroff**, para avaliação do coeficiente de atrito em mancal levemente carregado:

$$f = 2\pi^2 \frac{\mu m R}{P c}$$



Assimile

A equação de Petroff nos oferece dois parâmetros importantes: $\frac{\mu m}{P}$ e $\frac{R}{c}$. Ambos os parâmetros fornecem o número característico do mancal ou número de Sommerfeld, dado por: $S = \left(\frac{R}{c}\right)^2 \frac{\mu m}{P}$. O número de Sommerfeld é um adimensional muito importante, pois é calculado usando os parâmetros definidos pelo projetista. $\frac{R}{c}$ é da ordem de 500 a 1000 e é o inverso da razão de folga.



Pesquise mais

Para desenvolvimento de seus projetos, aprofunde o seu conhecimento sobre a teoria da lubrificação hidrodinâmica no Capítulo 13.8 de: JUVINALL, R. C.; MARSHEK; K. M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. Disponível na Biblioteca Virtual.

As cartas de projeto para mancais hidrodinâmicos estão disponíveis nas figuras dos Anexos de 4.1 a 4.7.



Veja o material anexo a esta seção acessando o link (http://cm-klr-s-content.s3.amazonaws.com/ebook/embed/qr-code/2019-1/projeto_maquinas/u4/s1/pro_maq_u4_s1_QR-code-anexo_1pv.docx) ou o QR Code.

Semelhantemente aos mancais de deslizamento, os **mancais de rolamento** são projetados para permitir um movimento relativo entre duas peças de máquina (eixo rotativo e estrutura fixa), enquanto suporta as cargas aplicadas (COLLINS; BUSBY; STAAB, 2017). No entanto, neste caso, o eixo rotativo é separado da estrutura fixa por elementos rolantes, dessa forma, o atrito rolante prevalece sobre o deslizante. O Anexo 4.8 apresenta exemplos de mancais de esferas disponíveis no mercado e o Anexo 4.9 apresenta exemplos de mancais de rolos.

Para que a seleção do mancal seja realizada, devemos decidir qual o tipo de mancal a ser utilizado. O tamanho do mancal, sua alocação e método de montagem devem ser parâmetros de decisão. O projetista deve se atentar também aos requisitos específicos de projeto em termos de carregamento, velocidades de operação, requisitos de vida de projeto, confiabilidade e características de operação. Em um primeiro momento, o tipo deve ser selecionado e, depois, o tamanho do mancal. O Anexo 4.10 apresenta uma orientação geral para a seleção do mancal, tendo em mente todos os aspectos a serem considerados no projeto.

As capacidades de carga básica têm por objetivo descrever a capacidade do mancal de rolamento de resistir à falha por fadiga superficial, medida pela capacidade de carga dinâmica básica C_d , e de contato, medida pela capacidade de carga estática básica C_s . Ambos os parâmetros são fornecidos por diversos fabricantes de rolamentos.

A capacidade de carga dinâmica básica $C_d(90)$ é a maior carga estacionária, em que 90% de um grupo de mancais irá resistir a 1 milhão de revoluções sem evidência de falha por fadiga superficial. A relação entre a carga radial (P) e a vida útil do mancal (L), expressa em revoluções para falha, é dada por: $\frac{L}{10^6} = \left(\frac{C_d}{P}\right)^a$, em que “a” é igual a 3 para mancais de esferas e a 10/3 para mancais de rolos.

A capacidade de carga radial estática básica C_s é a maior carga radial estacionária que irá produzir evidência significativa de marcas ou endentações no elemento mais carregado no ponto de contato. Isso é definido como qualquer deformação plástica maior que 0,0001 do diâmetro do elemento de rolagem.

Embora seja rotina dos fabricantes publicar em seus catálogos mancais com confiabilidade de 90%, algumas vezes o projetista precisa selecionar mancais com valores mais elevados de confiabilidade. Neste caso, o fator de confiabilidade de ajuste de vida, K_R (Anexo 4.11), pode ser utilizado para ajustar a capacidade de vida nominal do mancal para qualquer valor mais elevado de confiabilidade R . Dessa forma, a capacidade de vida para a confiabilidade ajustada é dada por:

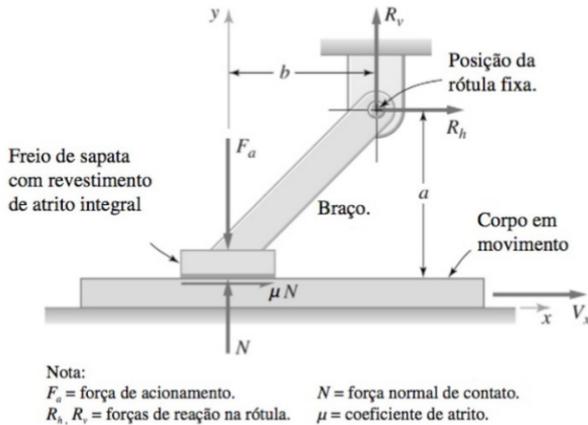
$$L_p = K_R L_{10}$$

Em que: L_{10} corresponde a uma confiabilidade $R = 90$ ou 10^6 revoluções.

O procedimento para análise e **projeto de freios** é fundamentalmente o mesmo para todos os tipos de freios e embreagens. O início do projeto requer que o projetista escolha um freio que seja compatível com a aplicação e, nesse momento, é importante que sejam consideradas restrições dimensionais do projeto. O par de material com o qual o freio será manufaturado deverá ser

escolhido com base nos prováveis modos de falha dominantes, nas condições operacionais e no tempo de resposta de acionamento do freio. O torque necessário para que se atinja a velocidade necessária no tempo idealizado deve ser estimado, bem como a energia a ser dissipada na região de contato de atrito. A distribuição de pressão sobre as superfícies de contato devem ser estimadas e a pressão na região de atrito deve ser determinada em função da máxima pressão. Vamos ao equacionamento tomando como base uma sapata curta e rígida do freio ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 | Freio de sapata simples, de articulação estacionária, acionado contra um corpo plano em movimento



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 588).

Nesse caso, assumimos que a distribuição de pressão é uniforme em toda a superfície da sapata, dessa forma, p (pressão em qualquer ponto especificado) é igual a $p_{máx}$ (máxima pressão na zona de contato). Como a pressão possui distribuição uniforme, a força normal N é dada por: $N = p_{máx}A$, em que A é a área de contato da superfície de atrito.

Construindo o diagrama de corpo livre e realizando a somatória de momentos em relação ao pino da rótula fixa, temos que: $F_a b - Nb + \mu Na = 0$.

$$\text{A força atuante necessária } F_a \text{ é dada por: } F_a = \frac{N(b - \mu a)}{b} = \frac{p_{máx} A (b - \mu a)}{b}.$$

Também podemos determinar a reação da força na rótula R_h pela somatória de forças horizontais: $R_h + \mu p_{máx} A = 0$, o que nos fornece: $R_h = -\mu p_{máx} A$ (o sentido da reação é para a esquerda).

A reação da força na rótula R_v , por sua vez, é determinada pela somatória de forças verticais:

$$R_v = p_{máx} A \left[\frac{b - \mu a}{b} - 1 \right]$$



Assimile

Utilizando o mesmo caso, podemos entender os conceitos adicionais de freio autofrenante e freio autodinâmico. De acordo com Collins, Busby e

Staab (2017), caso $\frac{(b-\mu a)}{b} \leq 0$, nenhuma força de acionamento externo

é necessária para que o freio seja acionado. O contato entre as superfícies causa acionamento imediato e total devido ao momento de atrito. Esse tipo de comportamento, dito autofrenante, não é desejado, pois o acionamento se dá de forma abrupta e incontrolável. Por outro lado, é interessante aproveitar o momento gerado por atrito para redução do valor de F_a . Isso caracteriza uma configuração autodinâmica. A determinação se um sistema vai ser autodinâmico sem ser autofrenante pode ser feita por meio da utilização do coeficiente de pseudoatrito μ' , que é estimado como, aproximadamente, $1,25 \mu$ a $1,5 \mu$, em que μ é o valor máximo do coeficiente de atrito especificado pelo fabricante do material do revestimento.

Os vasos de pressão são utilizados para armazenar fluidos pressurizados e podem assumir diversas formas ou combinações. Esses elementos podem ser pressurizados internamente ou externamente, podem ser constituídos por paredes finas ou grossas e, também, podem ter as extremidades abertas ou fechadas. São amplamente utilizados em tanques, dutos, canos de armas, atuadores hidráulicos ou pneumáticos, dentre outras aplicações.

Nos projetos de vasos de pressão, as discontinuidades geométricas requerem atenção especial, assim como as regiões concentradoras de tensão. O projetista também deve se atentar às junções do vaso com os tampos, independentemente de sua forma geométrica. O projeto de um vaso de pressão contempla o posicionamento de bocais (aberturas), janelas de inspeção e limpeza, soldas de costura, regiões de aumento ou diminuição de espessura e suportes para flanges. Para esse tipo de elemento, é importante que o engenheiro projetista consulte os códigos de projeto de vasos de pressão quando estiver envolvido em um projeto dessa natureza.

Nos Estados Unidos, a norma que deve ser respeitada por lei no caso de projetos de vasos de pressão é o Código ASME para Caldeiras e Vasos de Pressão (*ASME Boiler and Pressure Vessel Code*). No Brasil, o documento que dispõe especificações sobre vasos de pressão é a Norma Regulamentadora NR-13.

Os cilindros pressurizados ou vasos de pressão são classificados de acordo com a espessura de sua parede: cilindros de paredes finas ou cilindros de paredes grossas. Caso a espessura da parede (t) do cilindro seja igual ou inferior a 10% do seu diâmetro, a análise pode ser feita considerando-se vaso

de paredes finas. Caso contrário, a análise deve ser feita considerando parede grossa, uma vez que as componentes de tensão radial σ_r e tangencial σ_t na parede não se distribuem de forma linear.



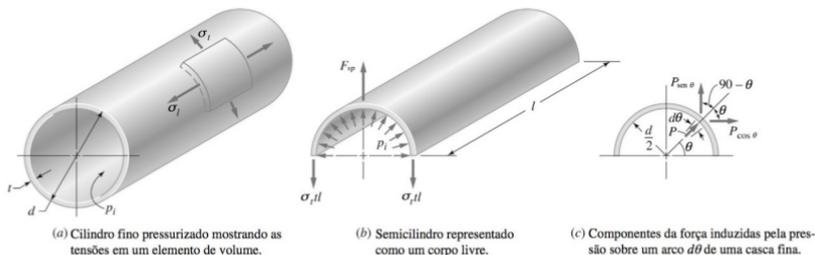
Pesquise mais

Caso a hipótese inicial (paredes finas) seja refutada, estude o equacionamento de cilindros para paredes grossas no Capítulo 9.7 de:

COLLINS, J. A.; BUSBY, H. R.; STAAB, G. H. **Projeto mecânico de elementos de máquinas**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Disponível na Biblioteca Virtual.

A Figura 4.5 (a) apresenta um cilindro fino pressurizado submetido a um estado de tensões biaxial.

Figura 4.5 | Análise de um cilindro de paredes finas



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 324).

Considerando a metade superior desse cilindro, conforme apresentado na Figura 4.5 (b), o equilíbrio de forças na vertical é dado por:

$$F_{vp} - 2(\sigma_t t l) = 0$$

Em que: F_{vp} é a componente vertical da força devido à pressão interna p_i ; essa variável pode ser encontrada integrando a componente vertical da força sobre a superfície semicircular. Quanto às demais variáveis, temos que: σ_t é a componente de tensão tangencial; t é a espessura do cilindro; e l é o comprimento do cilindro. Fazendo a integração (Figura 4.5 (c)), obtemos: $p_i dl - 2(\sigma_t t l) = 0$, em que dl é a área projetada.

Com isso, a componente tangencial de tensão é: $\sigma_t = \frac{p_i d}{2t}$.

Caso o cilindro seja fechado em suas extremidades, podemos obter a componente de tensão longitudinal σ_l por meio do equilíbrio de forças axiais no plano que passa perpendicularmente ao eixo do cilindro:

$$p_i \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) = \sigma_l (\pi dt)$$

Com isso, a componente longitudinal de tensão é: $\sigma_l = \frac{p_i d}{4t}$.



Exemplificando

Vamos determinar a componente tangencial e longitudinal nas tampas esféricas de um cilindro pressurizado que tem 8 mm de espessura de parede, 760 mm de diâmetro externo e pressão interna igual a 1,2 Mpa. Considerando nos cálculos o diâmetro interno, temos que:

1. Componente de pressão tangencial:

$$\sigma_t = \frac{p_i d}{2t} = \frac{p_i r}{t} = \frac{1,2(372)}{8} = 56 \text{ MPa}$$

2. Componente de pressão longitudinal:

$$\sigma_l = \frac{p_i d}{4t} = \frac{p_i r}{2t} = \frac{1,2(372)}{2(8)} = 28 \text{ MPa}$$

Este exercício deixa bastante claro que, em cilindros pressurizados de paredes finas, a componente de pressão tangencial é o dobro da componente de tensão longitudinal.

Sem medo de errar

Conforme a situação-problema apresentada, imagine que você trabalha no setor de engenharia de uma empresa e é o responsável pelo projeto de um redutor de velocidades simples com engrenagens de dentes retos para uma serra industrial, cuja vista espacial consta no Diálogo Aberto. Essa serra receberá 25 hp do eixo do motor elétrico girando a 1800 rpm. O eixo que irá acionar a serra deverá girar a 600 rpm, aproximadamente. Na primeira etapa de seu trabalho, você irá fazer a seleção dos mancais de rolamento de esferas, sendo dois para cada eixo. Importante ressaltar que a vida útil de projeto deve ser de 30000 horas, com 0,999 de confiabilidade.

Primeiro, é preciso determinar as cargas às quais os rolamentos estão submetidos. No caso do projeto em questão, as reações de apoio em cada eixo correspondem a essas cargas, que, de acordo com o engenheiro de cálculo responsável pelo projeto do eixo, são iguais a 250 lb. Como o sistema é simétrico, a carga nos 4 rolamentos são iguais.

A vida útil do rolamento depende da velocidade angular e da vida útil do projeto em horas. Para o eixo de entrada, que gira a 1800 rpm, temos que:

$$L = (30000h) \left(1800 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) = 3,24 \times 10^9 \text{ rev}$$

Para o eixo de saída, cuja velocidade angular é de 600 rpm, a vida útil (em termos de revoluções) é:

$$L = (30000h) \left(600 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) = 1,08 \times 10^9 \text{ rev}$$

Para o eixo de entrada, a carga dinâmica básica para rolamentos de esferas é dada por, considerando “a” igual a 3:

$$C_d = P_a \sqrt[3]{\frac{L}{10^6}} = 250 \sqrt[3]{\frac{3,24 \times 10^9}{10^6}} = 3699 \text{ lb}$$

Para o eixo de saída, a carga dinâmica básica é igual a:

$$C_d = P_a \sqrt[3]{\frac{L}{10^6}} = 250 \sqrt[3]{\frac{1,08 \times 10^9}{10^6}} = 2565 \text{ lb}$$

Considerando que o alojamento do mancal de rolamento no eixo de entrada tem 25 mm de diâmetro e que, no eixo de saída, um mancal será montado onde o eixo tem 25 mm de diâmetro e outro será montado em local que tem diâmetro de 35 mm, o rolamento pode ser selecionado através de catálogos de diversos fabricantes, tais como o catálogo de rolamentos rígidos de esferas, disponível em: <https://www.skf.com/br/products/bearings-unit-s-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html>, acesso em: 6 mar. 2019.

Para facilitar sua busca e seleção, a Tabela 4.1 apresenta, de forma resumida, esse catálogo, destacando os rolamentos possíveis de serem escolhidos nessa aplicação para o eixo de entrada. Já a Tabela 4.2 apresenta as opções para o eixo de saída.

Tabela 4.1 | Seleção do rolamento do eixo de entrada de acordo com as capacidades de carga para mancais radiais de esferas de uma carreira e canal profundo

Número do Mancal	Furo		Diâmetro Externo		Largura		Ratão de Adoçamento Máximo ¹		Diâmetro Mínimo de Encontro no Eixo ²		Capacidade de Carga Básica ³			Carga Aproximada de Limite de Fadiga ⁴ P _f		Velocidade-Limite ⁵ 10 ⁶ rpm	
	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	kN	10 ³ lbf	kN	10 ³ lbf	kN	10 ³ lbf	Com graxa/óleo
6000	10	0,3937	26	1,0236	8	0,3150	0,3	0,012	12	0,472	4,62	1,04	1,96	0,44	0,08	0,019	30/36
6200			30	1,1811	9	0,3543	0,6	0,024	14	0,551	5,07	1,14	2,36	0,53	0,10	0,023	24/30
6300			35	1,3780	11	0,4331	0,6	0,024	14	0,551	8,06	1,81	3,40	0,76	0,14	0,032	20/26
6002	15	0,5906	32	1,2598	9	0,3483	0,3	0,012	17	0,669	5,59	1,26	2,85	0,64	0,12	0,027	22/28
6202			35	1,3780	11	0,4331	0,6	0,024	19	0,748	7,80	1,75	3,75	0,84	0,16	0,036	19/24
6302			42	1,6535	13	0,5118	1	0,039	20	0,787	11,40	2,56	5,40	1,21	0,23	0,051	17/20
6004	20	0,7874	42	1,6535	12	0,4724	0,6	0,024	24	0,945	9,36	2,10	5,00	1,12	0,21	0,048	17/20
6204			47	1,8504	14	0,5512	1	0,039	25	0,984	12,70	2,86	6,55	1,47	0,28	0,063	15/18
6304			52	2,0472	15	0,5906	1	0,039	26,5	1,043	15,90	3,57	7,80	1,75	0,34	0,075	13/16
6005	25	0,9843	47	1,8504	12	0,4724	0,6	0,024	29	1,142	11,20	2,52	6,55	1,47	0,28	0,062	15/18
6205			52	2,0472	15	0,5906	1	0,039	30	1,181	14,00	3,15	7,80	1,75	0,34	0,075	12/15
6305			62	2,4409	17	0,6693	1	0,039	31,5	1,240	22,50	5,06	11,60	2,61	0,49	0,110	11/14
6006	30	1,1811	55	2,1654	13	0,5118	1	0,039	35	1,378	13,30	2,99	8,30	1,87	0,36	0,080	12/15
6206			62	2,4409	16	0,6299	1	0,039	35	1,378	19,50	4,38	11,20	2,52	0,48	0,107	10/13
6306			72	2,8346	19	0,7480	1	0,039	36,5	1,437	28,10	6,32	16,00	3,60	0,67	0,151	9/11
6007	35	1,3780	62	2,4409	14	0,5512	1	0,039	40	1,575	15,90	3,57	10,20	2,29	0,44	0,099	10/13
6207			72	2,8346	17	0,6693	1	0,039	41,5	1,634	25,50	5,73	13,30	3,44	0,66	0,147	9/11
6307			80	3,1496	21	0,8268	1,5	0,059	43	1,693	33,20	7,46	19,00	4,27	0,82	0,183	8,5/10
6008	40	1,5748	68	2,6772	15	0,5906	1	0,039	45	1,772	16,80	3,78	11,60	2,61	0,49	0,110	9,5/12
6208			80	3,1496	18	0,7087	1	0,039	46,5	1,831	30,70	6,90	19,00	4,27	0,82	0,183	8,5/10
6308			90	3,5433	23	0,9055	1,5	0,059	48	1,890	41,00	9,22	24,00	5,40	1,02	0,229	7,5/9
6009	45	1,7717	75	2,9528	16	0,6299	1	0,039	50	1,969	20,80	4,68	14,60	3,28	0,64	0,144	9/11
6209			85	3,3465	19	0,7480	1	0,039	51,5	2,028	33,20	7,46	21,60	4,86	0,92	0,206	7,5/9
6309			100	3,9370	25	0,9843	1,5	0,059	53	2,087	52,70	11,90	31,50	7,08	1,34	0,301	6,7/8
6010	50	1,9685	80	3,1496	16	0,6299	1	0,039	55	2,165	21,60	4,86	16,00	3,60	0,71	0,160	8,5/10
6210			90	3,5433	20	0,7874	1	0,039	56,5	2,224	35,10	7,89	23,20	5,22	0,98	0,220	7,8/5
6310			110	4,3307	27	1,0630	2	0,079	59	2,323	61,80	13,90	38,00	8,54	1,60	0,360	6,3/7,5
6011	55	2,1654	90	3,5433	18	0,7087	1	0,039	61,5	2,421	28,10	6,32	21,20	4,77	0,90	0,202	7,5/9
6211			100	3,9370	21	0,8268	1,5	0,059	63	2,480	43,60	9,80	29,00	6,52	1,25	0,281	6,3/7,5
6311			120	4,7244	29	1,1417	2	0,079	64	2,520	71,50	16,10	45,00	10,10	1,90	0,427	5,6/6,7

Fonte: adaptada de Collins, Busby e Staab (2017, p. 370).

Tabela 4.2 | Seleção do rolamento do eixo de saída de acordo com as capacidades de carga para mancais radiais de esferas de uma carreira e canal profundo

Número do Mancal	Furo		Diâmetro Externo		Largura		Ratão de Adoçamento Máximo ¹		Diâmetro Mínimo de Encontro no Eixo ²		Capacidade de Carga Básica ³			Carga Aproximada de Limite de Fadiga ⁴ P _f		Velocidade-Limite ⁵ 10 ⁶ rpm	
	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	kN	10 ³ lbf	kN	10 ³ lbf	kN	10 ³ lbf	Com graxa/óleo
6000	10	0,3937	26	1,0236	8	0,3150	0,3	0,012	12	0,472	4,62	1,04	1,96	0,44	0,08	0,019	30/36
6200			30	1,1811	9	0,3543	0,6	0,024	14	0,551	5,07	1,14	2,36	0,53	0,10	0,023	24/30
6300			35	1,3780	11	0,4331	0,6	0,024	14	0,551	8,06	1,81	3,40	0,76	0,14	0,032	20/26
6002	15	0,5906	32	1,2598	9	0,3483	0,3	0,012	17	0,669	5,59	1,26	2,85	0,64	0,12	0,027	22/28
6202			35	1,3780	11	0,4331	0,6	0,024	19	0,748	7,80	1,75	3,75	0,84	0,16	0,036	19/24
6302			42	1,6535	13	0,5118	1	0,039	20	0,787	11,40	2,56	5,40	1,21	0,23	0,051	17/20
6004	20	0,7874	42	1,6535	12	0,4724	0,6	0,024	24	0,945	9,36	2,10	5,00	1,12	0,21	0,048	17/20
6204			47	1,8504	14	0,5512	1	0,039	25	0,984	12,70	2,86	6,55	1,47	0,28	0,063	15/18
6304			52	2,0472	15	0,5906	1	0,039	26,5	1,043	15,90	3,57	7,80	1,75	0,34	0,075	13/16
6005	25	0,9843	47	1,8504	12	0,4724	0,6	0,024	29	1,142	11,20	2,52	6,55	1,47	0,28	0,062	15/18
6205			52	2,0472	15	0,5906	1	0,039	30	1,181	14,00	3,15	7,80	1,75	0,34	0,075	12/15
6305			62	2,4409	17	0,6693	1	0,039	31,5	1,240	22,50	5,06	11,60	2,61	0,49	0,110	11/14
6006	30	1,1811	55	2,1654	13	0,5118	1	0,039	35	1,378	13,30	2,99	8,30	1,87	0,36	0,080	12/15
6206			62	2,4409	16	0,6299	1	0,039	35	1,378	19,50	4,38	11,20	2,52	0,48	0,107	10/13
6306			72	2,8346	19	0,7480	1	0,039	36,5	1,437	28,10	6,32	16,00	3,60	0,67	0,151	9/11
6007	35	1,3780	62	2,4409	14	0,5512	1	0,039	40	1,575	15,90	3,57	10,20	2,29	0,44	0,099	10/13
6207			72	2,8346	17	0,6693	1	0,039	41,5	1,634	25,50	5,73	13,30	3,44	0,66	0,147	9/11
6307			80	3,1496	21	0,8268	1,5	0,059	43	1,693	33,20	7,46	19,00	4,27	0,82	0,183	8,5/10
6008	40	1,5748	68	2,6772	15	0,5906	1	0,039	45	1,772	16,80	3,78	11,60	2,61	0,49	0,110	9,5/12
6208			80	3,1496	18	0,7087	1	0,039	46,5	1,831	30,70	6,90	19,00	4,27	0,82	0,183	8,5/10
6308			90	3,5433	23	0,9055	1,5	0,059	48	1,890	41,00	9,22	24,00	5,40	1,02	0,229	7,5/9
6009	45	1,7717	75	2,9528	16	0,6299	1	0,039	50	1,969	20,80	4,68	14,60	3,28	0,64	0,144	9/11
6209			85	3,3465	19	0,7480	1	0,039	51,5	2,028	33,20	7,46	21,60	4,86	0,92	0,206	7,5/9
6309			100	3,9370	25	0,9843	1,5	0,059	53	2,087	52,70	11,90	31,50	7,08	1,34	0,301	6,7/8
6010	50	1,9685	80	3,1496	16	0,6299	1	0,039	55	2,165	21,60	4,86	16,00	3,60	0,71	0,160	8,5/10
6210			90	3,5433	20	0,7874	1	0,039	56,5	2,224	35,10	7,89	23,20	5,22	0,98	0,220	7,8/5
6310			110	4,3307	27	1,0630	2	0,079	59	2,323	61,80	13,90	38,00	8,54	1,60	0,360	6,3/7,5
6011	55	2,1654	90	3,5433	18	0,7087	1	0,039	61,5	2,421	28,10	6,32	21,20	4,77	0,90	0,202	7,5/9
6211			100	3,9370	21	0,8268	1,5	0,059	63	2,480	43,60	9,80	29,00	6,52	1,25	0,281	6,3/7,5
6311			120	4,7244	29	1,1417	2	0,079	64	2,520	71,50	16,10	45,00	10,10	1,90	0,427	5,6/6,7

Fonte: adaptada de Collins, Busby e Staab (2017, p. 370).

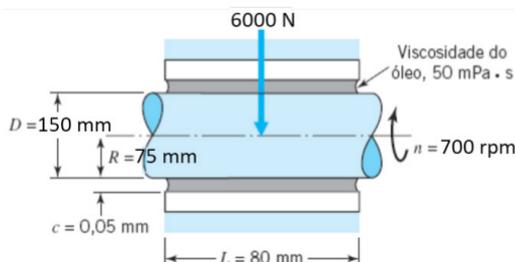
Fique atento aos modelos selecionados, iremos utilizar essas dimensões para fazer a modelagem 3D do projeto em etapas futuras!

Determinando a perda de potência em um mancal de deslizamento

Descrição da situação-problema

Você trabalha como analista do departamento de engenharia de uma empresa e precisa avaliar a potência dissipada em um mancal de deslizamento de uma máquina, cujo eixo de 150 mm de diâmetro é suportado por um mancal que tem 80 mm de comprimento e folga diametral de 0,10 mm. Na temperatura de operação, a viscosidade do óleo que lubrifica o conjunto é de 50 MPa. A velocidade do eixo é de 700 rpm e este suporta uma carga radial de 6 kN. O diagrama do mancal em questão é apresentado na Figura 4.6. O seu gerente espera que você, além de determinar a potência dissipada, faça uma análise sobre a viscosidade do óleo.

Figura 4.6 | Mancal de deslizamento



Fonte: adaptada de Juvinall e Marshek (2019, p. 336).

Resolução da situação-problema

Para que você prossiga com a análise, são levadas em consideração as seguintes hipóteses: não há excentricidade entre o mancal e o eixo e, também, não há fluxo de lubrificante na direção axial.

O coeficiente de atrito é dado pela equação a seguir, lembrando que P é a carga radial por unidade de área projetada do mancal. Nesse caso, estamos trabalhando com todas as unidades de comprimento em mm (milímetros).

$$f = 2\pi^2 \frac{\mu m R}{P c} = 2\pi^2 \frac{(0,05)(11,67)}{\frac{6000}{0,1 \times 0,08}} \frac{75}{0,05} = 0,023$$

O torque de atrito é dado por: $T_f = fWR = 0,023(6000)(0,075) = 10,35 \text{ N.m}$.

Finalmente, a potência dissipada é dada por:

$$P_{dissipada} = 2\pi T_f n = 2\pi(10,35)(11,67) = 759 \text{ W}$$

Com essa potência dissipada, é razoável analisar se o aumento da temperatura influenciou na alteração da viscosidade do óleo. Caso seja evidenciada alguma alteração, o novo valor de viscosidade deve ser considerado e o procedimento de cálculo refeito.

Faça valer a pena

1. Quando ocorre um movimento relativo entre superfícies, é preciso minimizar o atrito e o desgaste. A maioria dos projetos de mancais de deslizamento prevê o uso de lubrificante para redução de atrito e da perda da potência, além de dissipar o calor produzido. É ideal que a lubrificação dos mancais de deslizamento seja feita com lubrificante limpo e isento de partículas que possam desgastar os componentes envolvidos no movimento.

Analisando as diferentes condições de lubrificação, associe corretamente a coluna da esquerda com a coluna da direita.

Tipo de lubrificante	Característica do lubrificante
I - Lubrificação hidrodinâmica	Os picos da superfície ficam em contato de forma intermitente e ocorre um apoio hidrodinâmico parcial.
II - Lubrificação de filme misto	Os valores típicos de f estão na faixa de 0,05 a 0,20.
III - Lubrificação limitrofe	As superfícies são mantidas totalmente separadas devido à aplicação de fluido altamente pressurizado na área de carga do mancal.
IV - Lubrificação hidrostática	Os valores típicos do coeficiente de atrito (f) estão na faixa de 0,002 a 0,010.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência da associação correta entre a coluna da esquerda com a coluna da direita:

- a) II - III - IV - I.
- b) I - II - III - IV.
- c) II - I - III - IV.
- d) II - III - I - IV.
- e) I - IV - II - III.

2. No projeto de freios, caso $\frac{(b - \mu a)}{b} \leq 0$, _____ força de acionamento externo é necessária para que o freio seja acionado. Esse tipo de comportamento, dito _____, não é desejado, pois o acionamento se dá de forma _____ e _____. Por outro lado, é interessante aproveitar o momento gerado por atrito

para _____ do valor de F_a . Isso caracteriza uma configuração _____.

Qual das alternativas a seguir, apresenta os termos que preenchem corretamente as lacunas do texto-base?

- a) nenhuma – autodinâmica – abrupta – controlável – aumento – autofrenante.
- b) elevada - autofrenante – suave – controlável – redução – autodinâmica.
- c) nenhuma – autofrenante – abrupta – incontrolável – redução – autodinâmica.
- d) elevada – autodinâmica – abrupta – incontrolável – aumento – autofrenante.
- e) reduzida – autofrenante – suave – controlável – redução – autodinâmica.

3. Em projeto de cilindros pressurizados, as paredes oferecem baixa resistência à flexão, enquanto os esforços atuam tangencialmente à superfície desses cilindros. Imagine a situação em que você está projetando um cilindro pressurizado, o qual será fabricado com um material cuja tensão última é $\sigma_u = 400$ MPa. O coeficiente de segurança adotado no projeto é igual a 4 e os parâmetros geométricos do vaso de pressão dados: diâmetro externo igual a 750 mm e pressão interna de 4,2 MPa.

Selecione a alternativa que indica a menor espessura de parede a ser usada no projeto:

- a) 7,71 mm.
- b) 3,90 mm.
- c) 15,97 mm.
- d) 1,95 mm.
- e) 15,12 mm.

Elementos de potência

Diálogo aberto

Prezado aluno, existem diversas formas de transmissão de potência. A forma mais simples de transferência de movimento rotativo de um eixo a outro é por meio de um par de cilindros que giram. Há também diversas configurações, podendo ser um conjunto externo de cilindros ou, até mesmo, interno. Nesse tipo de mecanismo, as principais características são a capacidade baixa de transferência de potência, bem como a possibilidade de escorregamento. Como algumas aplicações requerem que se tenha sincronismo entre a fase do eixo de entrada e a fase do eixo de saída, a esses cilindros são adicionados dentes e, então, esses elementos recebem a denominação de engrenagens. Quando duas engrenagens estão em contato, elas formam um par de engrenagens, sendo que a menor delas leva o nome de pinhão e a maior, de coroa. Esse par de engrenagens é a configuração mais simples de um trem de engrenagem, elementos característicos presentes nos projetos de redutores de velocidade.

Quando é necessária a obtenção de diferentes rotações na saída para uma única rotação de entrada, podemos fazer uma combinação de redutores e/ou multiplicadores utilizando um dispositivo mecânico chamado variador de velocidade. O variador de velocidade escalonado permite que a variação na relação de transmissão seja feita de forma escalonada, como acontece quando você aciona a marcha de sua bicicleta. Nesse caso, a transmissão de movimento é feita por uma corrente; existem, no entanto, variadores de velocidade escalonada que utilizam engrenagens em seu mecanismo.

Finalmente, outra maneira de transmissão de potência é a situação em que o movimento rotativo é transformado em movimento de translação, tal como ocorre em macacos, fusos ou atuadores lineares. O mecanismo responsável por esse mecanismo é o parafuso de potência, conhecido também como parafuso de avanço.

Retomemos o projeto desenvolvido por você, no departamento de engenharia: o desenvolvimento de um redutor de velocidade simples com engrenagens de dentes retos de uma serra industrial. Na primeira etapa do projeto, você determinou os rolamentos a serem utilizados para apoio dos eixos de entrada e saída. Nesse momento, a serra receberá 25 hp do eixo do motor elétrico girando a 1800 rpm (velocidade do pinhão). O eixo que acionará a serra deverá girar a 600 rpm (velocidade da engrenagem), aproximadamente, e você deverá projetar o par de engrenagens. Além dos

parâmetros relacionados à operação, temos de considerar a vida útil de 30 mil horas e a confiabilidade de 0,999.

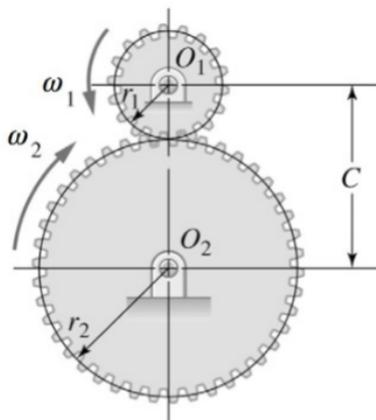
Com seu conhecimento a respeito de **trens de engrenagens**, quais são as decisões de projeto para que o engrenamento trabalhe de forma suave e com pouco ruído? Qual o processo de cálculo para dimensionamento das engrenagens? Como definir a geometria da engrenagem para as condições de projeto? Vamos em frente com nosso projeto, pois o resultado do trabalho deve ser entregue em breve. Lembre-se de que a feira internacional de máquinas e equipamentos está chegando!

Não pode faltar

Você já estudou o procedimento para dimensionamento de engrenagens e, provavelmente, conhece o mecanismo de um trem de engrenagens. A Figura 4.7 ilustra a forma mais simples de um trem de engrenagens.

No entanto, é possível que, dependendo do objetivo do projeto, empreguemos diversos arranjos de engrenagens, como é apresentado na Figura 4.8. Podemos classificar os trens de engrenagens em simples, composto ou epicicloide. O trem de engrenagens epicicloidal é composto de várias engrenagens distribuídas uniformemente em volta de órbita concêntrica. A circulação das engrenagens retas é feita por analogia à órbita dos planetas no sistema solar, por isso, esse sistema também é chamado de trem de engrenagens planetárias. Esse tipo de trem de engrenagem é utilizado quando se procura um sistema mais compacto e com capacidade elevada de redução.

Figura 4.7 | Trem de engrenagens simples composto de engrenagens cilíndricas de dentes retos



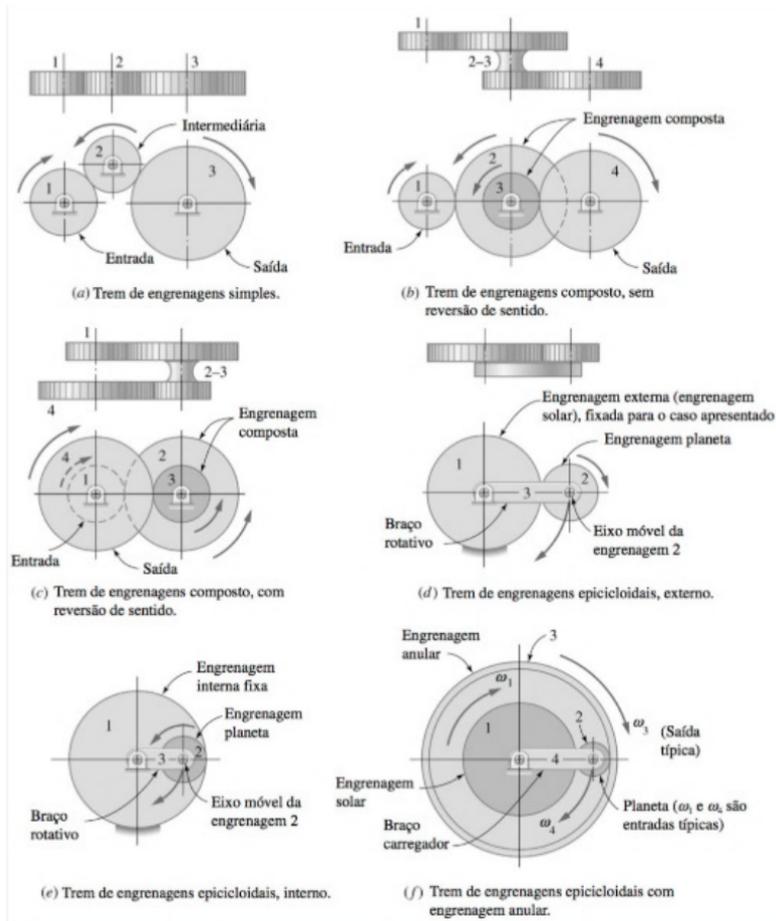
Fonte: adaptada de Collins, Busby e Staab (2017, p. 493).



Assimile

Um trem de engrenagens é uma sequência de diversas engrenagens acopladas de forma que a velocidade de saída, torque ou sentido de rotação estejam de acordo com as condições específicas de projeto, relacionadas às variáveis de entrada (COLLINS; BUSBY; STAAB, 2017).

Figura 4.8 | Tipos de trens de engrenagens



Fonte: adaptada de Collins, Busby e Staab (2017, p. 499).



Refleta

Observe a Figura 4.8 e analise a função da engrenagem 2 e da engrenagem 3. Quais funções essas engrenagens exercem no mecanismo? Analise as demais engrenagens da mesma forma.

Duas engrenagens concêntricas montadas em um eixo comum, girando com a mesma velocidade angular são chamadas de engrenagem composta; dessa forma, o trem de engrenagens é denominado trem de engrenagens composto, conforme ilustrado na Figura 4.8 (b) e Figura 4.8 (c). No primeiro caso, o trem de engrenagem é classificado como não invertido, uma vez que os eixos de entrada e saída não são colineares; o segundo caso trata de um trem de engrenagem composto com inversão, uma vez que os eixos de entrada e saída são colineares, configuração comum em aplicações com restrições de espaço, como acontece no projeto de transmissões automotivas.

A razão de redução para a engrenagem em um trem em que todas as engrenagens tenham eixos de rotação fixos pode ser descrita, para trens de engrenagens simples, compostos, internos, externos, de dentes retos, helicoidais, cônicos ou com sem-fim, como:

$$\frac{\omega_{\text{saída}}}{\omega_{\text{entrada}}} = \frac{n_{\text{saída}}}{n_{\text{entrada}}} \pm \left| \frac{\text{produto do número de dentes das engrenagens motoras}}{\text{produto do número de dentes das engrenagens movidas}} \right|$$

O sinal negativo (-) representa razões entre engrenamentos externos e o sinal positivo (+) representa razões entre engrenamentos internos. Para trens redutores de velocidade, a razão do trem de engrenagem resultante será menor do que 1. No caso de um trem de engrenagens multiplicador, essa razão será maior do que 1.

Observe, agora, a Figura 4.8 (d) e a Figura 4.8 (e): existe um braço que gira em torno de um ponto fixo, conduzindo uma engrenagem, a engrenagem *planeta*, a girar, não somente em torno do próprio eixo, mas também ao redor do centro do braço condutor. Isso faz com que o trem de engrenagem não tenha somente um, mas dois graus de liberdade, o que altera a determinação da razão de redução. No entanto, é importante observar que o arranjo apresentado na Figura 4.8 (d) é inexecutável, uma vez que o eixo orbita a engrenagem solar. Nesse caso, é necessário que uma engrenagem na forma de anel, acoplada à engrenagem planeta, e concêntrica, à engrenagem solar, seja adicionada ao sistema (Figura 4.8 (f)).



Refleta

Você consegue imaginar quais as vantagens de um trem de engrenagens planetário?

A razão de engrenagens planetárias é proposta utilizando a condição cinemática básica:

$$\omega_{\text{engrenagem}} = \omega_{\text{braço}} + \omega_{\text{eng/braço}}$$

Em que $\omega_{\text{engrenagem}}$ é a velocidade angular da engrenagem relativa à carcaça fixa, $\omega_{\text{braço}}$ é a velocidade angular do braço relativa à carcaça fixa e, finalmente, $\omega_{\text{eng/braço}}$ é a velocidade angular da engrenagem relativa ao braço. Considerando a equação de razão de engrenagens vista anteriormente, temos que:

$$\frac{\omega_U - \omega_{\text{braço}}}{\omega_p - \omega_{\text{braço}}} = \pm \frac{\text{produto do número de dentes das engrenagens motoras}}{\text{produto do número de dentes das engrenagens movidas}}$$

Em que ω_p é a velocidade angular da primeira engrenagem do trem, ω_U é a velocidade angular da última engrenagem do trem e $\omega_{\text{braço}}$ é a velocidade angular do braço. Aqui, novamente, o sinal negativo (-) representa razões entre engrenamentos externos e o sinal positivo (+) representa razões entre engrenamentos internos. Para que essa equação possa ser utilizada, é necessário garantir que a primeira e a última engrenagens do trem girem em eixos presos à carcaça e que se tenha uma sequência ininterrupta de engrenamentos que unam as duas.



Exemplificando

Vamos determinar a razão de engrenagens de um trem de engrenagens epicicloidal com engrenagem anular.

Imagine que a engrenagem solar tenha 40 dentes, que a engrenagem planeta tenha 20 dentes e que a anular, que se encontra estacionária, tenha 80 dentes. A entrada é o braço e a engrenagem solar é a saída.

Nessa configuração, supondo uma velocidade angular do braço $\omega_{\text{braço}}$ igual a 1 rpm e uma velocidade de saída nula, pois a engrenagem anular encontra-se estática. Dessa forma, temos que:

$$\frac{\omega_U - \omega_{\text{braço}}}{\omega_p - \omega_{\text{braço}}} = \pm \frac{\text{produto do número de dentes das engrenagens motoras}}{\text{produto do número de dentes das engrenagens movidas}}$$

$$\frac{0 - 1}{\omega_p - 1} = \left(-\frac{40}{20} \right) \left(+\frac{20}{80} \right) = -0,5$$

$$\omega_p = +3$$

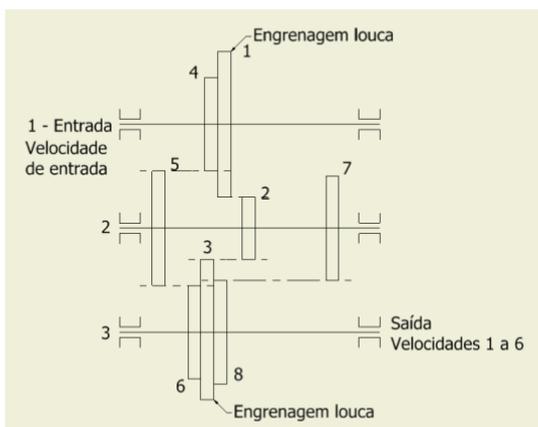
Isso indica que a razão desse engrenamento é 3, e que a engrenagem solar roda na mesma direção que a do braço, no entanto, com velocidade angular três vezes maior.

O projeto pode também requerer que se tenham diversas rotações de saída para a mesma rotação de entrada. Nesse caso, são empregados os variadores de velocidade, que podem ser escalonados ou contínuos e podem ser empregados em sistemas de transmissão por engrenagens, polias/correias e correntes.

A variação de velocidade no variador de velocidade escalonado é feita de forma escalonada, com um número finito de relações possíveis, uma vez que cada elemento tem um par designado, como ocorre na marcha de uma bicicleta ou em uma máquina operatriz. Nos variadores escalonados de engrenagens, as engrenagens podem estar fixas nos eixos, deslocáveis, soltas ou acopláveis e podem estar dispostas nas seguintes configurações, conforme citado por Silva (2013):

1. Engrenagens substituíveis e engrenagens de troca: é o arranjo mais simples em que, para que se obtenha a relação de transmissão desejada, são substituídas duas ou mais engrenagens.
2. Variadores do tipo bloco deslizante (básicos): compostos de dois ou mais pares de engrenagens unidas por eixos apoiados em mancais fixos. Um exemplo desse tipo de variador de velocidade é o de dois escalões, em que a velocidade angular é transformada uma vez por um primeiro par de engrenagens e, posteriormente, atinge a velocidade final pelo par de engrenagens seguinte. A atuação dos pares de engrenagens é feita pela ação de acoplamentos ou por deslocamento axial. Para que se obtenham três diferentes velocidades de saída, utiliza-se o variador de três escalões.
3. Variadores de múltiplos blocos deslizantes: união em série de variadores básicos de dois escalões para obtenção de um variador de três eixos com quatro escalões. Esse variador também pode ser ampliado: acrescentando mais um variador básico de dois escalões, consegue-se obter oito velocidades diferentes de saída. A Figura 4.9 apresenta um variador escalonado de três eixos e seis escalões (velocidades de saída).

Figura 4.9 | Exemplo de variador de múltiplos blocos deslizantes



Fonte: elaborada pela autora.

4. Variadores com “zigzagague” e recondução: neste tipo de variador, as engrenagens são montadas em buchas, e são ligadas ao eixo por meio de acoplamentos.
5. Variadores de inversão: são variadores que têm o objetivo de mudar o sentido da rotação, ramificar a saída, unir diversas saídas, além de alterar o plano de entrada ou saída.



Pesquise mais

Para conhecer mais sobre os variadores de velocidade escalonados e entender sua aplicação nos projetos de máquinas, assista aos primeiros cinco minutos do vídeo a seguir:

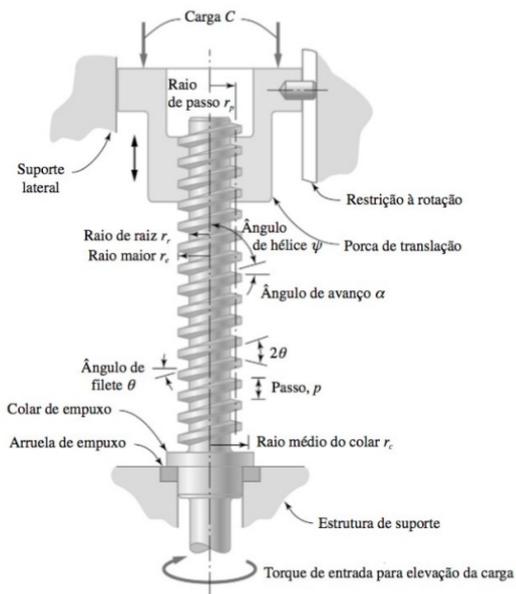
TELECURSO 2000 Manutenção 25 Variadores e redutores de velocidade e manutenção de engrenagens. [S.l.]: Fiesp *et al.*, [entre 1995 e 2008]. 1 vídeo (12min01s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=0sx1QWA337k>. Acesso em: 22 mar. 2019.

Assista também ao vídeo que ilustra de forma muito clara o funcionamento de uma transmissão:

EATON Transmissão. [S.l.]: EATON, 1 nov. 2012. 1 vídeo (8min36s). Publicado pelo canal canalpellegrino. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=FJ_U7nc9i5M. Acesso em: 22 mar. 2019.

Você consegue se lembrar de algum elemento de máquina utilizado para converter movimento rotacional em linear, podendo levantar ou movimentar grandes cargas? Lembre-se das disciplinas anteriores do curso: para esse tipo de aplicação, utilizamos os parafusos de potência, chamados também de parafusos de avanço, cuja configuração básica e montagem é ilustrada na Figura 4.10. Uma característica fundamental é que esse elemento de máquina deve ter a rosca mais forte do que as existentes em aplicações de parafusos de fixação, que têm por objetivo manter partes unidas, resistindo às cargas de cisalhamento. Alguns exemplos de parafusos de potência incluem macacos para elevação de cargas, grampos em C, morsas e fusos.

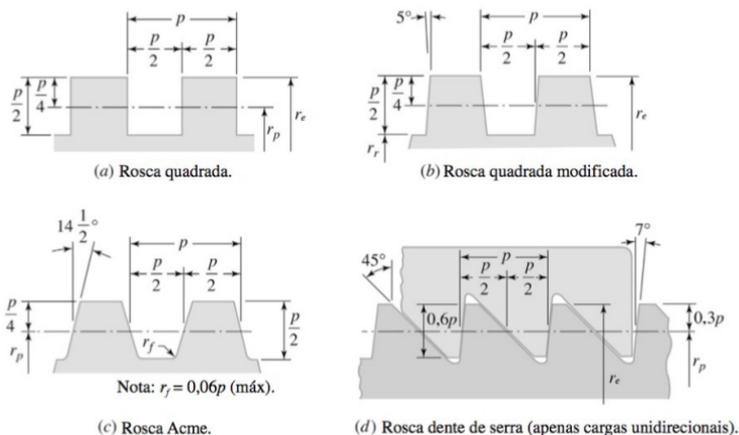
Figura 4.10 | Configuração básica de um parafuso de elevação de carga – montagem



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 389).

As roscas desse tipo de parafuso são projetadas para maximizar a capacidade de carga axial, reduzindo o atrito por arrasto. A Figura 4.11 apresenta as formas de roscas mais utilizadas e a Tabela 4.3 apresenta a padronização de dimensões desse tipo de parafuso.

Figura 4.11 | Formatos de rosca de parafusos de potência que são montados nos equipamentos



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 390).

Tabela 4.3 | Dados para filetes de rosca de parafusos de potência utilizados para sua utilização e montagem

Diâmetro maior (externo), em polegadas	Filetes por polegada		
	Quadrada e Quadrada modificada	Acme	Dente de Serra
1/4	10	16	--
5/16	--	14	--
3/8	--	12	--
3/8	8	10	--
7/16	--	12	--
7/16	--	10	--
1/2	6 1/2	10	16
5/8	5 1/2	8	16
3/4	5	6	16
7/8	4 1/2	6	12
1	4	5	12
1 1/2	3	4	10
2	2 1/4	4	8

Diâmetro maior (externo), em polegadas	Filetes por polegada		
	Quadrada e Quadrada modificada	Acme	Dente de Serra
$2 \frac{1}{2}$	2	3	8
3	$1 \frac{3}{4}$	2	6
4	$1 \frac{1}{2}$	2	6
5	--	2	5

Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 391).



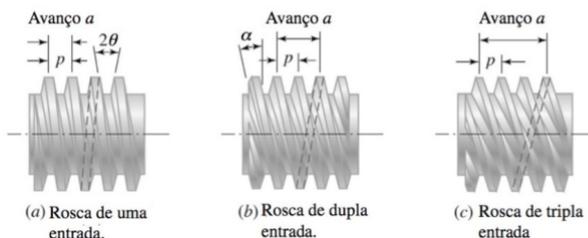
Assimile

Vamos a algumas terminologias de parafusos de potência:

1. Passo: distância axial de um ponto de referência do helicóide até o ponto correspondente do filete de rosca adjacente.
2. Diâmetro maior (externo): corresponde a $d_e = 2r_e$.
3. Ângulo de avanço (α): complemento do ângulo de hélice; é o ângulo entre o plano tangente ao passo de hélice de uma rosca quadrada e o plano normal ao eixo.
4. Avanço (a): deslocamento axial para se completar uma volta da porca no parafuso.

Importante: se a configuração de rosca for simples, o avanço será igual ao passo. Se forem utilizadas configurações de roscas de duas ou três entradas, o avanço será o dobro ou o triplo do passo, respectivamente. Essas configurações são ilustradas na Figura 4.12.

Figura 4.12 | Configurações de roscas



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 391).

Para que se realize o projeto do parafuso de potência, é preciso verificar se ele está sendo tracionado ou comprimido. Caso esteja submetido à compressão, devemos considerar a flambagem para determinação do

diâmetro do parafuso. A fim de se prevenir as falhas devido ao desgaste ou fadiga, é importante que a flexão na rosca, as tensões de cisalhamento e esmagamento nos filetes na região de contato sejam determinados. Considerando esses aspectos, é interessante que o projetista siga o seguinte procedimento:

1. Selecione o material para o parafuso e porca, além da forma da rosca.
2. Caso exista compressão no parafuso, determine o diâmetro preliminar considerando a flambagem. Caso isso não ocorra, estime o diâmetro preliminar com base na tensão normal.
3. Determine o passo de rosca, avanço e demais dimensões com base na forma de rosca (vide Figura 4.11) e nos dados padronizados (vide Tabela 4.3).
4. Calcule o torque necessário para a montagem do parafuso de potência:

Para **levantamento de carga**, determina-se T_R , através da equação:

$$T_R = C r_p \left[\frac{a \cos \theta + 2\pi r_p \mu_r}{2\pi r_p \cos \theta - a \mu_r} \right] + C r_c \mu_c$$

Em que:

T_R = torque requerido para levantamento da carga.

C = carga axial.

a = avanço.

θ = ângulo de rosca.

r_p = raio do passo.

μ_r = coeficiente de atrito na rosca.

r_c = raio do colar.

μ_c = coeficiente de atrito no colar.

Para **abaixamento de carga**, determina-se T_C , através da equação:

$$T_C = C r_p \left[\frac{-a \cos \theta + 2\pi r_p \mu_r}{2\pi r_p \cos \theta + a \mu_r} \right] + C r_c \mu_c$$

Em que:

T_C = torque requerido para abaixamento da carga.

5. Identifique pontos e seções críticas e determine as tensões no parafuso e na rosca, para avaliar se o projeto está aceitável.
6. Utilize um fator de segurança para cada modo provável de falha e calcule as tensões de projeto para cada material escolhido.
7. Comparando as tensões nominais determinadas no passo 5 e as de projeto, determinadas no passo 6, verifique se é necessário fazer alterações na geometria para que o projeto atenda aos requisitos de segurança e funcionalidade.

Sem medo de errar

Retomemos o desenvolvimento de um redutor de velocidade simples com engrenagens de dentes retos de uma serra industrial. Na primeira etapa do projeto, você determinou os rolamentos a serem utilizados para apoio dos eixos de entrada e saída. Neste momento, considerou que a serra receberá 25 hp do eixo do motor elétrico girando a 1800 rpm (velocidade do pinhão). O eixo que acionará a serra deverá girar a 600 rpm (velocidade da engrenagem), aproximadamente, e você deverá projetar o par de engrenagens. Além dos parâmetros relacionados à operação, temos de considerar a vida útil de 30 mil horas e a confiabilidade de 0,999.

Para que o engrenamento trabalhe de forma suave e com pouco ruído, é interessante que o projetista opte por uma engrenagem com um maior número de dentes. Nesse projeto, a razão de engrenamento, dada pelo quociente da velocidade de entrada e velocidade de saída, é igual a 3. Com isso, para engrenagens de dentes retos com ângulo de pressão de 20°, optaremos por um pinhão de 20 dentes ($N_p = 20$). O número de dentes N_G na engrenagem é dado por:

$$N_G = \frac{\omega_{\text{entrada}}}{\omega_{\text{saída}}}(N_p) = \frac{1800}{600}(20) = 60 \text{ dentes}$$

Com o conhecimento de Elementos de Máquinas II, definindo o passo diametral igual a 6, você definiu todos os parâmetros de dentes de engrenagem e de engrenamento. Os dados encontram-se resumidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 | Parâmetros de dentes de engrenagem e de engrenamento

Projeto Serra Industrial			
Parâmetro		Valor	Unidade
Potência de entrada		25	hp
Velocidade de entrada		1800	rpm
Velocidade de saída		600	rpm
Razão de engrenamento	m_G	3	
Ângulo de pressão	Φ	20	graus
Número de dentes pinhão	N_P	20	dentes
Número de dentes engrenagem	N_G	60	dentes
Passo diametral	p_d	6	in
Passo circular de referência	p_c	0,524	in
Passo de base	p_b	0,492	in
Diâmetro do pinhão	d_P	3,333	in
Diâmetro da engrenagem	d_G	10	in
Distância entre centros	C	6,667	in
Adendo	a	0,167	in
Dedendo	b	0,208	in
Profundidade total	h_t	0,375	in
Folga	c	0,042	in
Diâmetro externo do pinhão	d_{OP}	3,667	in
Diâmetro ext. da engrenagem	d_{OG}	10,333	in

Fonte: elaborada pela autora.

Com esses dados, você deve prosseguir com a análise de cargas, cujos resultados encontram-se disponíveis na Tabela 4.5. Uma vez determinada a carga transmitida, você deve seguir com a análise de tensões de flexão e de tensões superficiais de acordo o procedimento proposto pela AGMA.

Tabela 4.5 | Análise de carga do trem de engrenagens

Projeto Serra Industrial - Análise de carga			
Parâmetro		Valor	Unidade
Torque no eixo do pinhão	T_P	875,352	lb.in
Velocidade angular no pinhão	ω_P	188,496	rad/s
Torque de saída	T_G	2626,06	lb.in
Carga transmitida	W_t	525,211	lb
Componente radial da carga	W_r	191,161	lb
Carga total	W	558,918	lb

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 4.6 apresenta os coeficientes e os resultados obtidos da análise de tensão de flexão e a Tabela 4.7 apresenta os coeficientes e os resultados obtidos da análise de tensão de superfície.

Tabela 4.6 | Análise de tensões de flexão

Projeto Serra Industrial - Análise da tensão de flexão			
Parâmetro		Valor	Unidade
Largura da face	F	2	in
Fator de aplicação*	K_a	1	
Fator de distribuição da carga	K_m	1,6	
Fator de tamanho	K_s	1	
Velocidade da linha de referência	V_t	1570,796	ft/min
Índice de qualidade	Q_v	6	
Coefficiente B	B	0,825	
Coefficiente A	A	59,773	
Fator de velocidade	K_v	0,601	
Fator de borda**	K_B	1	
Fator de ciclo de carga	K_I	1	
Fator de geometria de flexão	J_P	0,335	
Fator de geometria de flexão	J_G	0,410	
Tensão de flexão (pinhão)	σ_{bP}	12515,240	psi
Tensão de flexão (engrenagem)	σ_{bG}	10225,867	psi

*supõe-se carga uniforme.

** considera-se espessura de borda bem maior que a profundidade do dente

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 4.7 | Análise de tensão de superfície/desgaste

Projeto Serra Industrial - Análise da tensão superficial			
Parâmetro		Valor	Unidade
Largura da face	F	2	in
Fator de aplicação*	C_a	1	
Fator de distribuição da carga	C_m	1,6	
Fator de tamanho	C_s	1	
Fator de superfície**	C_f	1	
Velocidade da linha de referência	V_t	1570,796	ft/min
Índice de qualidade	Q_v	6	
Coefficiente B	B	0,825	
Coefficiente A	A	59,773	
Fator de velocidade	C_v	0,601	
Coefficiente de Poisson***	ν_P/ν_G	0,280	
Módulo de Elasticidade***	E_P/E_G	30000000,000	
Coefficiente elástico	C_p	2276,143	
Fator geométrico	I	0,121	
Tensão de superfície (pinhão)	σ_{pP}	94927,507	psi
Tensão de sup. (engrenagem)	σ_{pG}	54806,422	psi

*supõe-se carga uniforme.

**supõe-se engrenagens bem acabadas produzidas convencionalmente.

*** matéria-prima é o aço

Fonte: elaborada pela autora.

Analisando a flexão dos dentes do pinhão, considerando que as engrenagens serão fabricadas com aço endurecido por completo AGMA grau 2, com dureza de 250 HB, o número de tensão admissível de flexão para o pinhão e para a engrenagem é dado por:

$$S_t = 102H_B + 16400 = 102(250) + 16400 = 41900 \text{ psi}$$

Para o pinhão, o fator de segurança à flexão do dente é:

$$S_{fp} = \frac{S_t Y_N / (K_T K_R)}{\sigma_{bp}} = \frac{41900(0,918) / [1(1,25)]}{12515,240} = 2,5$$

Considerando a engrenagem, temos que o fator de segurança à flexão é:

$$S_{fp} = \frac{S_t Y_N / (K_T K_R)}{\sigma_{bp}} = \frac{41900(0,936) / [1(1,25)]}{10225,867} = 3,5$$

Os fatores obtidos para a flexão são aceitáveis. Agora, considerando as mesmas condições de projeto, a resistência à fadiga de contato é dada por:

$$S_c = 349H_B + 34300 = 349(250) + 34300 = 121550 \text{ psi}$$

Para o pinhão, o fator de segurança ao desgaste é:

$$S_{fp} = \frac{S_t Y_N / (K_T K_R)}{\sigma_{bp}} = \frac{121550(0,876) / [1(1,25)]}{94927,507} = 0,89$$

Considerando a engrenagem, temos que o fator de segurança ao desgaste é:

$$S_{fp} = \frac{S_t Y_N / (K_T K_R)}{\sigma_{bp}} = \frac{121550(0,898) / [1(1,25)]}{54806,422} = 1,6$$

Em relação ao desgaste, o material escolhido não atende aos requisitos de projeto, pois o fator de segurança resultou em um valor não satisfatório para o pinhão. A sugestão é que você altere a dureza do pinhão até que seja alcançado um valor satisfatório para o fator de segurança. Para melhorar ainda mais, altere também a dureza da engrenagem.

Projeto de um parafuso de potência

Descrição da situação-problema

Você está desenvolvendo um projeto de um macaco de parafuso, similar ao apresentado na Figura 4.10, para erguer cargas por meio de um acionamento elétrico. A carga a ser levantada tem 2.000 lb. É uma premissa de projeto considerar a forma de rosca quadrada modificada de uma entrada, com diâmetro externo de 1,50 in. O diâmetro médio do colar é 1,75 in. A lubrificação do parafuso e da porca será feita com óleo (dica: considere o atrito estático igual a 0,15).

Seu gerente quer que você emita um relatório de projeto respondendo aos seus principais questionamentos: quais os torques necessários para levantar e baixar? O projeto atende a essa premissa de autotravamento?

Resolução da situação-problema

A partir da Tabela 4.3 verificamos que para a rosca quadrada modificada com o diâmetro proposto existem 3 filetes por polegada, logo, o avanço (a) é igual a 0,33 polegada.

Pela Figura 4.11 (b), verifica-se que o ângulo de rosca (θ) é igual a 5° e que o raio do passo (r_p) é dado por: $r_p = r_e - \frac{p}{4} = 0,75 - \frac{0,33}{4} = 0,67$ in .

O ângulo de avanço é dado pela seguinte equação:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a}{2\pi r_p} = \tan^{-1} \frac{0,33}{2\pi(0,67)} = \tan^{-1} 0,078 = 4,5^\circ$$

Para **levantamento de carga**, determina-se T_R , através da equação:

$$T_R = Cr_p \left[\frac{a \cos \theta + 2\pi r_p \mu_r}{2\pi r_p \cos \theta - a \mu_r} \right] + Cr_c \mu_c$$

$$T_R = 2000(0,67) \left[\frac{0,33 \cos 5^\circ + 2\pi(0,67)(0,15)}{2\pi(0,67) \cos 5^\circ - 0,33(0,15)} \right] + 2000(0,875)(0,15)$$

$$T_R = 310,475 + 265,5 = 573 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

Para **abaixamento de carga**, determina-se T_c , através da equação:

$$T_c = Cr_p \left[\frac{-a \cos \theta + 2\pi r_p \mu_r}{2\pi r_p \cos \theta + a \mu_r} \right] + Cr_c \mu_c$$

$$T_c = 2000(0,67) \left[\frac{-0,33 \cos 5^\circ + 2\pi(0,67)(0,15)}{2\pi(0,67) \cos 5^\circ + 0,33(0,15)} \right] + 2000(0,875)(0,15)$$

$$T_c = 95,6 + 265,5 = 361 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

A rosca é **autotravante** se: $\mu_r > \frac{a \cos \theta}{2\pi r_p} = \frac{a \cos \theta}{2\pi r_p} = \frac{0,33 \cos 5^\circ}{2\pi(0,67)}$

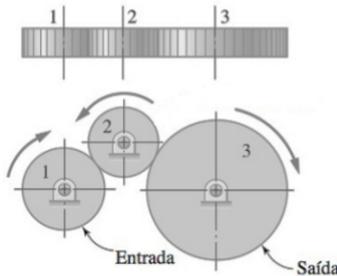
$$\mu_r > 0,08$$

O coeficiente de atrito é 0,15, portanto, o sistema tem autotravamento e atende às premissas de projeto.

Faça valer a pena

1. Um trem de engrenagens _____ forma um arranjo em que cada eixo suporta apenas uma engrenagem. No trem de engrenagens ilustrado na Figura 4.13, a engrenagem 2 exerce a função de _____ o sentido de rotação da engrenagem 3, mas _____ a intensidade da razão de velocidades angulares entre a engrenagem _____ 3 e o pinhão _____ 1. Por essa razão, a engrenagem 2 é chamada de _____.

Figura 4.13 | Trem de engrenagens simples



Fonte: adaptada de Collins, Busby e Staab (2017, p. 499).

Qual das alternativas a seguir, apresenta os termos que preenchem corretamente as respectivas lacunas do texto-base?

- a) simples; manter; altera; de entrada; de saída; intermediária.
- b) simples; inverter; não altera; de saída; de entrada; intermediária.
- c) composto; manter; altera; de saída; de entrada; engrenagem planeta.
- d) composto; inverter; não altera; de saída; de entrada; intermediária.
- e) simples; inverter; altera; de entrada; de saída; engrenagem fixa.

2. O projeto de máquinas pode requerer diversas rotações de saída para a mesma rotação de entrada; nesse caso, são empregados os variadores de velocidade. Esses variadores podem ser escalonados ou contínuos e podem ser empregados em sistemas de transmissão por engrenagens, polias/correias e correntes. Analise os tipos de variadores apresentados a seguir e suas características:

Tipo de variador escalonado	Características dos variadores escalonados
I. Engrenagens substituíveis e engrenagens de troca	A) Variador composto de dois ou mais pares de engrenagens unidas por eixos apoiados em mancais fixos; a atuação dos pares de engrenagens se dá por meio de acoplamentos ou deslocamento axial.
II. Variadores do tipo bloco deslizante (básicos)	B) As engrenagens são montadas em buchas, e são ligadas ao eixo por meio de acoplamentos.
III. Variadores de múltiplos blocos deslizantes	C) Tem o objetivo de mudar o sentido da rotação, ramificar a saída, unir diversas saídas, além de alterar o plano de entrada ou saída.
IV. Variadores com “zigzague” e recondução	D) União em série de variadores básicos para a obtenção de um número maior de velocidades de saída.
V. Variadores de inversão	E) É o arranjo mais simples em que são substituídas duas ou mais engrenagens.

Analisando os diferentes arranjos de variadores escalonados de velocidade, assinale a alternativa que associa corretamente a coluna da esquerda (tipos de variadores) com a coluna da direita (suas características):

- a) I-A; II-B; III-C; IV-D; V-E.
- b) I-E; II-A; III-D; IV-C; V-B.
- c) I-A; II-E; III-D; IV-B; V-C.
- d) I-E; II-A; III-D; IV-B; V-C.
- e) I-E; II-A; III-B; IV-C; V-D.

3. Para converter movimento rotacional em linear, podendo levantar ou movimentar grandes cargas, utilizamos os parafusos de potência, chamados também de parafusos de avanço. Uma característica fundamental é que esse elemento de máquina deve ter a rosca mais forte do que as existentes em aplicações de parafusos de fixação. Considere um parafuso com rosca ACME com $\frac{3}{4}$ de polegada de diâmetro maior, utilizado para levantar uma carga de 450 lb. O diâmetro médio do colar é de 4 cm e o coeficiente de atrito é igual a 0,06.

Selecione a alternativa que indica corretamente o torque para elevação da carga; o torque para abaixamento da carga; e se o parafuso tem autotravamento, respectivamente.

- a) 42,63 lb.in; 18,61 lb.in; não tem autotravamento.
- b) 63,12 lb.in; 38,94 lb.in; não tem autotravamento.
- c) 38,94 lb.in; 63,12 lb.in; tem autotravamento.
- d) 88,80 lb.in; 64,30 lb.in; tem autotravamento.
- e) 18,61 lb.in; 42,63 lb.in; tem autotravamento.

Elementos auxiliares de potência

Diálogo aberto

Prezado aluno, na última seção, estudamos um elemento de máquina de transmissão muito utilizado em veículos automotivos: a engrenagem. Imagine o torque do motor transmitido até a saída da transmissão por um trem de engrenagens. Para alterar a relação de transmissão, é preciso que um par do conjunto seja desacoplado e, na sequência, outro par seja acoplado. Como as engrenagens são elementos rígidos, os dentes sofreriam com o impacto causado pelo acoplamento brusco da carga ao motor. De forma a evitar esse tipo de choque, o motor é desacoplado da linha de transmissão com o uso da embreagem, que possibilita a mudança de marcha (relação de transmissão), sem que se tenham danos às engrenagens; se as rotações forem diferentes, os elementos de atrito da embreagem deslizarão até que estas sejam iguais.

Os fabricantes de freios e embreagens fornecem em seus catálogos informações bastante completas sobre torque e potência de diferentes modelos de embreagens disponíveis no mercado. Esse material disponibilizado também apresenta o procedimento de seleção desses elementos de máquinas, baseado no torque e na potência, de acordo com a aplicação desejada e outros aspectos relacionados ao produto final em desenvolvimento. O projetista deve estar atento a essas recomendações e, também, deve prestar atenção nos fatores de serviço, que mudam de acordo com o fabricante.

Para suavizar as variações na velocidade de um eixo devido às variações de torque, utiliza-se o volante. Esse dispositivo deve ser dimensionado para fornecer o coeficiente de flutuação de velocidade desejado. Falhas em volantes são indesejadas, pois quando isso ocorre durante seu funcionamento o dispositivo quebra em diversos pedaços, podendo causar ferimentos nos operadores ou comprometer demais componentes da máquina.

Voltando ao nosso desafio: o projeto final do redutor de velocidades. Ao longo desta unidade, dimensionamos os principais componentes de um redutor de velocidades simples com engrenagens de dentes retos para uma serra industrial (rolamentos e trem de engrenagens). Neste momento, você está prestes a entregar o projeto final e precisamos gerar algumas imagens para que o departamento de marketing produza o material que será apresentado na próxima feira internacional de máquinas e equipamentos. Para isso, você precisa apresentar o modelo 3D de todos os componentes do redutor e projetar uma carcaça para proteção e sustentação de todos os itens que

fazem parte do conjunto. Quais os cuidados em relação aos detalhes finais do projeto? Como os rolamentos serão montados na carcaça do redutor? Quais são as boas práticas para que se permita realização de manutenção no conjunto? Aqui, você precisará aplicar seus conhecimentos de desenho técnico mecânico, assistido por computador, utilizando o software Autodesk Inventor® para atingir o objetivo final e apresentar um trabalho de qualidade elevada. Lembre-se de criar animações e de inserir imagens renderizadas no novo catálogo que será apresentado na feira internacional de máquinas e equipamentos.

Bons estudos!

Não pode faltar

A embreagem é um dispositivo que conecta gradual e suavemente dois componentes rotativos, com velocidades angulares distintas, em relação a uma linha de centro comum, trazendo os dois componentes para uma mesma velocidade angular após seu acionamento. O projeto de uma embreagem segue basicamente os passos indicados a seguir.

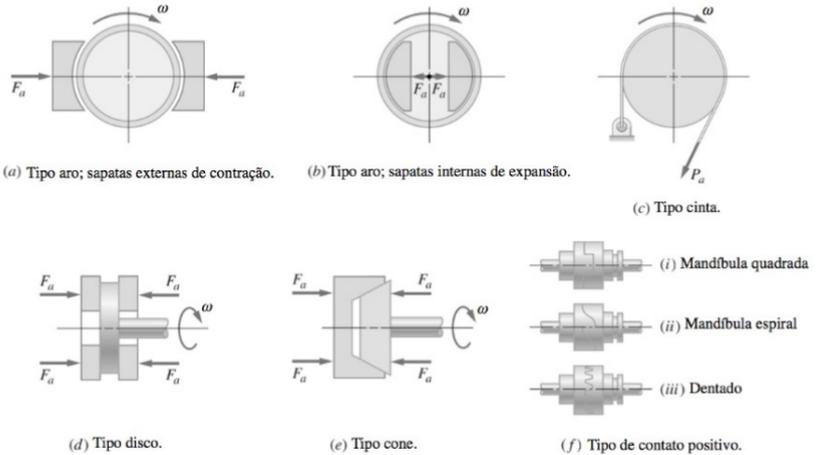
1. Selecione o tipo de embreagem (Figura 4.14) mais adequado à sua aplicação, considerando todas as restrições de projeto, sejam elas dimensionais ou geométricas.



Assimile

Na Figura 4.14 os dispositivos tipo aro, sapatas internas e externas são usados exclusivamente como freios.

Figura 4.14 | Tipos usuais de embreagens



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 585).

2. O par de materiais de atrito deve ser selecionado levando em consideração o modo de falha dominante, condições operacionais e tempo de resposta do acionamento.
3. Para a velocidade e tempo de resposta desejados, determine o torque necessário para acelerar ou desacelerar o dispositivo. Isso deve ser feito considerando os efeitos inerciais de todas as massas significativas, que influenciam na velocidade angular da embreagem.
4. Estime a energia dissipada como calor na zona de contato de atrito.
5. Determine a distribuição de pressão sobre as superfícies de contato por atrito.
6. Em função da pressão máxima (p_{\max}), estime a pressão em qualquer ponto da interface de atrito.
7. Determine a força de acionamento, torque de atrito e reações nos mancais e, em função desses valores, considerando o fator de segurança especificado, determine dimensões e faça a seleção dos materiais adequados.
8. Caso a configuração não atenda às especificações operacionais e de confiabilidade, faça as alterações necessárias, por meio de um processo iterativo, até que todos os requisitos sejam atendidos. Verifique também se a taxa calor produzido devido ao atrito excede a taxa de resfriamento, de forma a evitar que o dispositivo seja danificado.

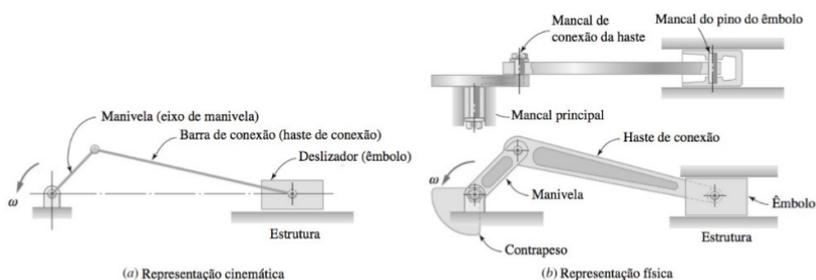


Pesquise mais

Relembre o equacionamento de embreagens revisando o material de Elementos de Máquinas II. Nas Seções 3.2 (embreagens de cinta) e 3.3 (embreagens de disco e cônica), da Unidade 3, você relembrará do equacionamento para dimensionamento desses elementos, de acordo com o tipo de embreagem que você selecionará para o seu projeto.

Agora, imagine uma situação em que o projeto tem como objetivo transformar movimento rotativo em linear ou vice-versa. A Figura 4.15 apresenta uma solução bastante utilizada para resolver esse tipo de problema: o mecanismo biela-manivela com deslizador.

Figura 4.15 | Representação cinemática e física de um mecanismo biela-manivela com deslizador



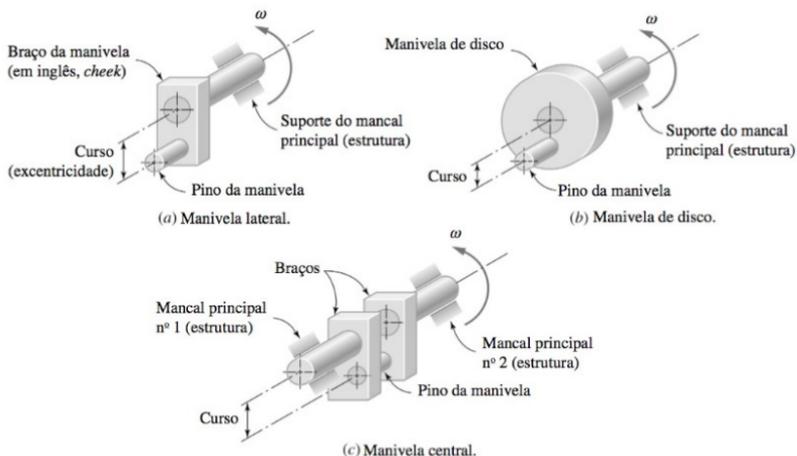
Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 683).

Basicamente, os **eixos de manivela** podem ser divididos em dois tipos: manivelas laterais (manivelas com carga em balanço), apresentado na Figura 4.16 (a), e manivelas centrais (manivelas com carga entre mancais), apresentado na Figura 4.16 (c). Uma variação da manivela lateral, a manivela de disco é utilizada quando o raio requerido da manivela, ou “curso”, é pequeno, como apresentado na Figura 4.16 (b). Conforme Collins, Busby e Staab (2017), apresentamos a seguir o procedimento para o desenvolvimento de um eixo de manivela:

1. Considerando as especificações de operação e configuração geral do sistema, elabore um esboço inicial para o projeto.
2. Com isso, determine deslocamentos, velocidades e acelerações ao longo de um ciclo completo.
3. Conceba uma geometria básica para o eixo de manivela considerando função e restrições dimensionais.
4. Faça uma análise de forças global incluindo as forças de superfície e de corpo sobre o mecanismo em todas as fases cinemáticas.

5. Calcule e represente todas as forças agindo durante cada fase (crítica) no eixo de manivela (considerando o diagrama de corpo livre).
6. Avalie os pontos críticos e determine as forças e os momentos agindo em cada uma das seções críticas.
7. Em função das regiões de concentração de tensões e da natureza cíclica das cargas agindo sobre um eixo de manivela, os elementos estruturais são susceptíveis a falha por fadiga, por fratura frágil ou por escoamento. Aplicações de eixos de manivelas utilizam tanto mancais de rolamento quanto de deslizamento, que é o mais comum. Nesse caso, quando da utilização de mancais de deslizamento, a falha pode ser dada por desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste corrosivo, desgaste por fadiga superficial, desgaste por contato, aderência, ou, em algumas aplicações, escoamento ou fratura frágil. Identifique quais são os prováveis modos de falha.
8. Faça uma pré-seleção do material para o eixo (dentre os materiais mais utilizados, estão o ferro fundido, o aço fundido e o aço trabalhado) e avalie o melhor processo de fabricação do eixo.
9. Selecione um fator de segurança de projeto.
10. Determine as tensões para os modos de falha prováveis que você identificou.
11. Através de um processo iterativo, determine as dimensões que satisfaçam as especificações de projeto e que forneçam uma vida útil adequada.

Figura 4.16 | Tipos de eixos de manivelas



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 684).



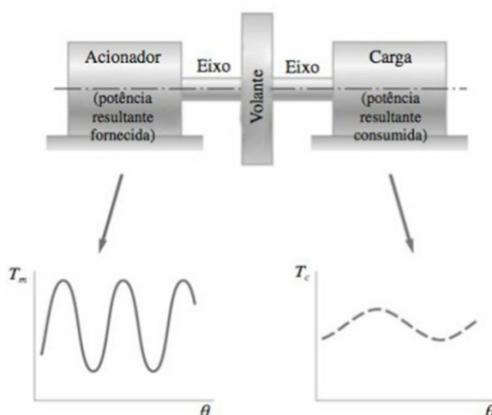
Pesquise mais

Verifique um exemplo completo de dimensionamento de um eixo de manivela na página 686 do livro a seguir:

COLLINS, J. A.; BUSBY, H. R.; STAAB, G. H. **Projeto mecânico de elementos de máquinas**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Disponível em <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1935-2/cfi/706!4/4@0.00:0.00>. Acesso em: 22 mar. 2019.

Os **volantes** atuam como um reservatório de energia cinética em máquinas girantes (Figura 4.17). Tem como principal função controlar as flutuações de velocidade angular e de torque.

Figura 4.17 | Esquema de um sistema com volante



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 661).

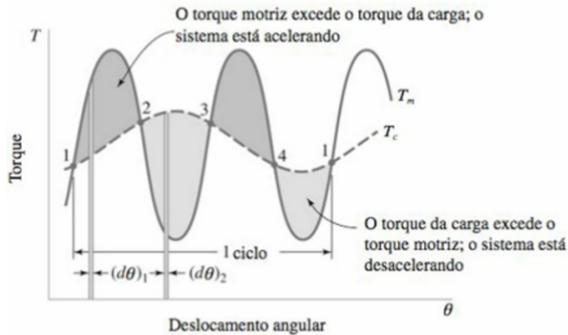
O torque motriz (T_m) é positivo quando seu sentido coincide com o sentido da rotação do eixo e o acionador fornece energia ao sistema. O torque de carga (T_c) é positivo quando o sentido é o mesmo da rotação e o sistema está fornecendo energia à carga.



Exemplificando

A Figura 4.18 apresenta o gráfico de torque versus deslocamento angular em que as curvas do torque motriz e do torque de carga estão sobrepostas.

Figura 4.18 | Sobreposição das curvas de torque motriz e torque de carga



Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 662).

Observe que durante os instantes de tempo em que o torque motriz fornecido excede o torque de carga necessário, a massa do volante é acelerada e a energia cinética é armazenada no volante. Durante os instantes em que o torque de carga excede o torque motriz fornecido, a massa do volante é desacelerada e parte da energia cinética do volante é perdida.

Dentre as principais vantagens, o projeto de um volante pode fazer com que o projetista obtenha:

1. Redução da amplitude de flutuação da velocidade.
2. Redução do pico do torque motriz necessário.
3. Tensões reduzidas em eixos, acoplamentos e demais componentes do sistema.
4. Energia automaticamente armazenada ou retirada conforme a necessidade.

Se a velocidade angular média ($\omega_{méd}$) do sistema em rotação é inalterada ao longo do tempo, é necessário que a energia cinética fornecida ao sistema seja igual ao trabalho realizado durante cada ciclo, ou seja: $d(KE) = d(W)$, em que KE é a energia cinética fornecida ao sistema do volante, e W, o trabalho resultante realizado. Para uma massa com momento de inércia de massa J e velocidade angular ω , temos que:

$$KE = \frac{1}{2} J \omega^2, \text{ logo}$$

$$d(KE) = \frac{1}{2} J d(\omega^2)$$

Supondo que o eixo é submetido a um torque resultante igual a $T_c - T_m$: $d(W) = (T_c - T_m) d\theta$. De acordo com o balanço proposto no início, temos que:

$$\frac{1}{2} J d(\omega^2) = (T_c - T_m) d\theta$$

Integrando a equação, temos que: $\frac{1}{2} J \int_{\omega_{\min}^2}^{\omega_{\max}^2} d(\omega^2) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (T_c - T_m) d\theta \equiv U_{\max}$, em que U_{\max} é a variação máxima na energia cinética.

Dessa forma, temos que: $\frac{1}{2} J (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) = U_{\max}$.

Fatorando o lado esquerdo: $J \left(\frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \right) (\omega_{\max} - \omega_{\min}) = U_{\max}$, com $\left(\frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \right) = \omega_{\text{med}}$. Fazendo a substituição, temos: $J \omega_{\text{med}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) = U_{\max}$. $(\omega_{\max} - \omega_{\min})$ é a flutuação da velocidade angular durante o ciclo operacional.

Dessa forma, define-se um coeficiente de flutuação de velocidade C_f , como: $C_f \equiv \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{med}}}$. Os valores de coeficiente de flutuação de velocidade são apresentados na Tabela 4.8 com base em experimentação.

Tabela 4.8 | Coeficiente de flutuação de velocidade C_f

Nível necessário de uniformidade na velocidade	C_f
Muito uniforme	$\leq 0,003$
Sistemas de controle giroscópio	
Discos rígidos	
Uniforme	0,003-0,012
Geradores de CA	
Máquinas de fiação	
Alguma flutuação aceitável	0,012-0,05
Máquinas-ferramenta	
Compressores, bombas	
Flutuação moderada aceitável	0,05-0,2
Misturadoras de concreto	
Escavadeiras	
Grandes flutuações aceitáveis	$>0,2$
Trituradoras	
Prensas puncionadoras	

Fonte: Collins, Busby e Staab (2017, p. 663).

Utilizando a velocidade angular média e o coeficiente de flutuação de velocidade, podemos reescrever a equação:

$$J \omega_{\text{med}}^2 C_f = U_{\max}$$



Refleta

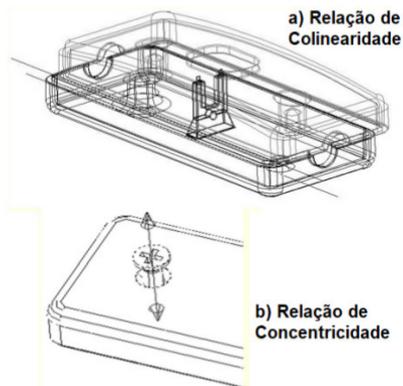
Você consegue, com base no equacionamento apresentado, estabelecer um procedimento para dimensionamento de volantes? Elabore uma planilha eletrônica para facilitar o desenvolvimento de seus projetos.

Considerando o projeto de todos os elementos de máquinas envolvidos na aplicação, é claro que todos esses dispositivos projetados e/ou selecionados atuarão de forma conjunta, ou seja, haverá um processo de montagem, união desses dispositivos de forma a se respeitar tolerâncias e ajustes. Além disso, precisamos projetar uma base que sirva de apoio para o conjunto de elementos de máquinas, considerando forças e momentos transferidos para essa estrutura.

Uma vez definidas as dimensões dos componentes, o projetista modelará cada parte (incluindo a base ou proteção da máquina, pois esse item também é constituinte importante do projeto) e produzirá um desenho correspondente, indicando dimensões, tolerâncias dimensionais e geométricas, matéria-prima e demais informações pertinentes ao projeto. Importante ressaltar que o tamanho, a forma e a seleção de materiais devem satisfazer os requisitos funcionais de suportar as cargas sem que ocorra uma falha, e manter a precisão dimensional necessária ao longo da vida de projeto prescrita, fazendo isso a um custo aceitável.

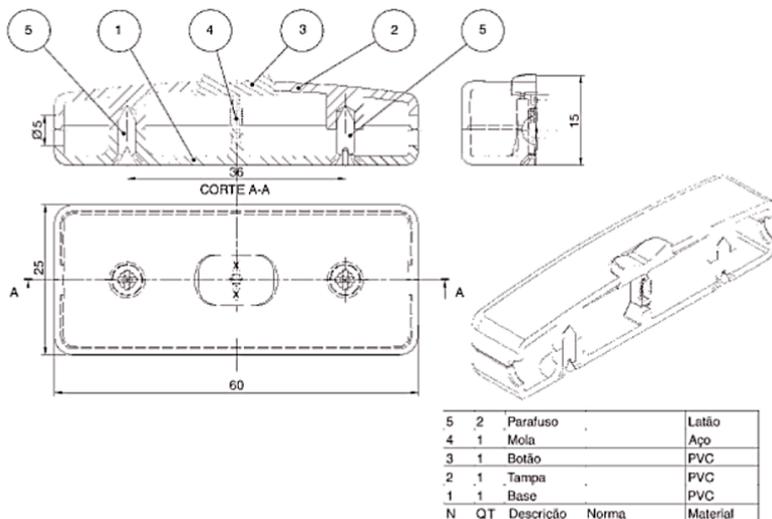
Finalizado cada um dos componentes, é realizado o conjunto de montagem em que são especificadas todas as relações de vínculos e restrições entre os componentes, considerando coaxialidade de componentes cilíndricos, faces paralelas ou coplanares, eixos paralelos ou arestas paralelas entre si, como ilustrado na Figura 4.19. Os desenhos de conjunto devem ser confeccionados indicando as vistas geradas na projeção ortogonal, vistas em corte, detalhes, bem como a lista de componentes (Figura 4.20).

Figura 4.19 | Exemplos de restrições de montagens



Fonte: adaptada de Silva *et al.* (2006, p. 385).

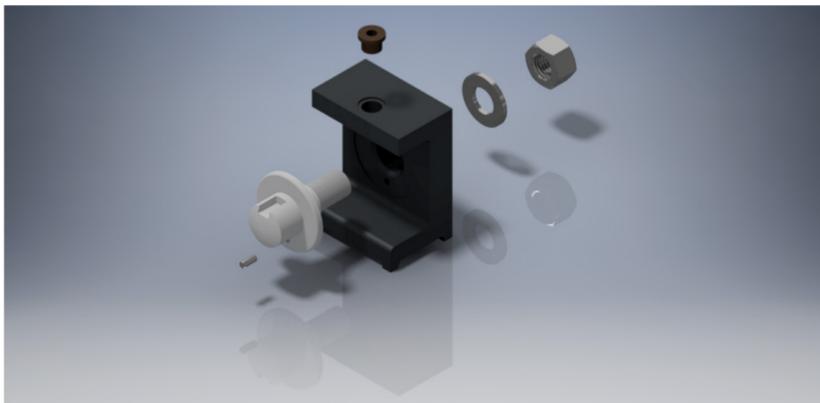
Figura 4.20 | Desenho de conjunto



Fonte: Silva *et al.* (2006, p. 386).

Ainda, a partir dos modelos tridimensionais, podemos produzir modelos realistas com inserção de textura e cores, sendo possível a utilização de animações, tais como apresentado na vista explodida renderizada de um conjunto de montagem de um dispositivo para eixo (Figura 4.21).

Figura 4.21 | Vista explodida renderizada de um conjunto mecânico



Fonte: elaborada pela autora.

Futuro engenheiro, você agora consegue dimensionar e modelar os mais diferentes elementos de máquinas para a realização de seus projetos.

Vamos colocar este conhecimento em prática!

Sem medo de errar

Após o dimensionamento de todos os componentes, você precisa apresentar o modelo 3D de todos os componentes do redutor da serra industrial e projetar uma carcaça para proteção e sustentação de todos os itens que fazem parte do conjunto. Os rolamentos foram selecionados na primeira seção desta unidade. Considerando que o alojamento do mancal de rolamento no eixo de entrada tem 25 mm de diâmetro no eixo de entrada e que, no eixo de saída, um mancal será montado onde o eixo tem 25 mm de diâmetro e o outro será montado em local com diâmetro de 35 mm, o rolamento pode ser selecionado através de catálogos de diversos fabricantes: o rolamento de entrada é o 6305 e os de saída, 6205 (para o alojamento de 25 mm). Os dados do trem de engrenagens encontram-se resumidos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 | Parâmetros de dentes de engrenagem e de engrenamento

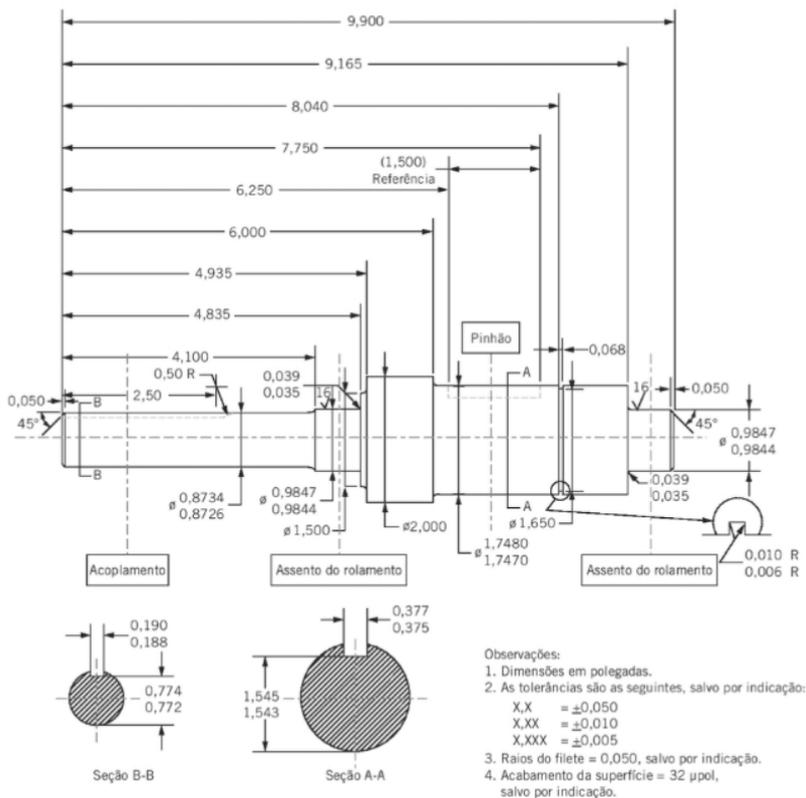
Projeto serra industrial			
Parâmetro		Valor	Unidade
Potência de entrada		25	hp
Velocidade de entrada		1800	rpm
Velocidade de saída		600	rpm
Razão de engrenamento	m_G	3	
Ângulo de pressão	Φ	20	graus
Número de dentes pinhão	N_P	20	dentes
Número de dentes engrenagem	N_G	60	dentes
Passo diametral	p_d	6	in
Passo circular de referência	p_c	0,524	in
Passo de base	p_b	0,492	in
Diâmetro do pinhão	d_P	3,333	in
Diâmetro da engrenagem	d_G	10	in
Distância entre centros	C	6,667	in
Adendo	a	0,167	in
Dedendo	b	0,208	in
Profundidade total	h_t	0,375	in
Folga	c	0,042	in
Diâmetro externo do pinhão	d_{OP}	3,667	in
Diâmetro ext. da engrenagem	d_{OG}	10,333	in

Fonte: elaborada pela autora.

O eixo de entrada e o eixo de saída, projetados por outro engenheiro, são apresentados na Figura 4.22 e na Figura 4.23, respectivamente. Nos pontos em que os filetes são especificados, foi necessária a verificação de uma tensão final, para garantir que os fatores de concentração de tensão sejam aceitáveis e seguros. Os detalhes do assento foram indicados depois do dimensionamento de todos os componentes.

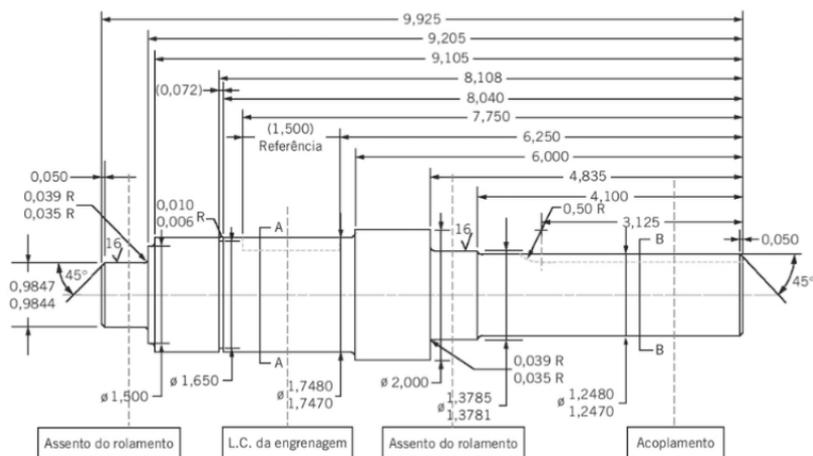
Cada um dos rolamentos será assentado em um flange. O flange do eixo deve ter dimensão suficiente para proporcionar uma superfície plana e sólida para apoiar a lateral da pista interna, mas não poderá ser alto a ponto de ter contato com a pista externa do rolamento. As dimensões devem seguir o que indica a Figura 4.24.

Figura 4.22 | Eixo de entrada



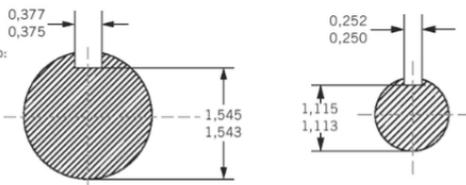
Fonte: Mott (2015, p. 635).

Figura 4.23 | Eixo de saída



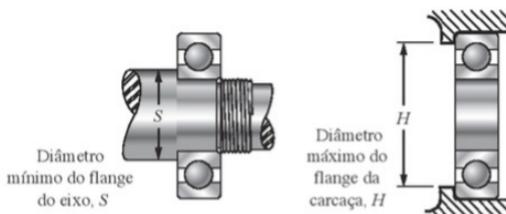
Observações:

1. Dimensões em polegadas,
2. As tolerâncias são as seguintes, salvo por indicação:
 X,X = $\pm 0,050$
 X,XX = $\pm 0,010$
 X,XXX = $\pm 0,005$
3. Raios do filete = 0,050, salvo por indicação,
4. Acabamento da superfície = 32 μpol , salvo por indicação.



Fonte: Mott (2015, p. 636).

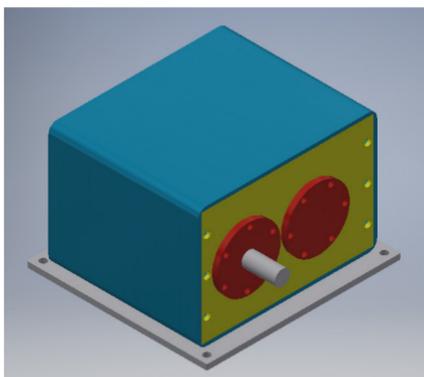
Figura 4.24 | Diâmetros do flange do eixo e da carcaça



Fonte: Mott (2015, p. 635).

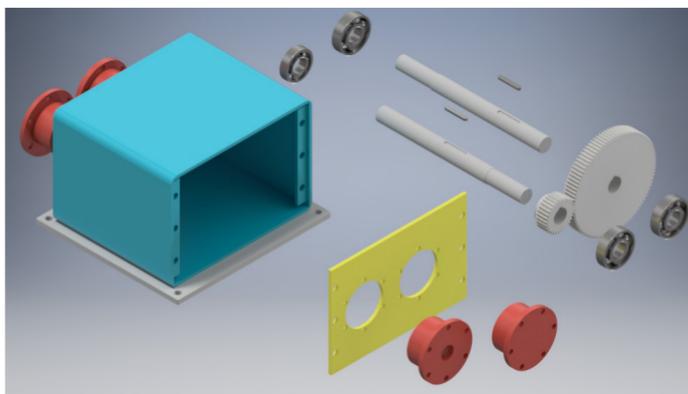
Para finalizar o projeto, devemos projetar uma carcaça para proteger e sustentar eixos, engrenagens e rolamentos. É importante prever formas de lubrificação da engrenagem dentro da carcaça e, também, fornecer vedações para os eixos de entrada e de saída. Precisamos, enquanto projetamos, tomar alguns cuidados em relação ao posicionamento de elementos de fixação (parafusos, pinos, travas) e dos componentes no interior da carcaça, de forma que esta consiga ser aberta facilmente e, na montagem, sejam evitadas interferências entre os componentes. Para auxiliar seu trabalho de modelagem, a

Figura 4.26 | Modelo 3D do redutor de velocidades em perspectiva isométrica



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 4.27 | Vista explodida renderizada do redutor de velocidades



Fonte: elaborada pela autora.

Bons estudos!

Avançando na prática

Projetando uma embreagem de múltiplos discos

Descrição da situação-problema

Você está trabalhando no projeto de uma embreagem de discos múltiplos molhados, que deve ser dimensionada para transmitir um torque de 75 N.m. O diâmetro externo do disco não pode ultrapassar 90 mm, por restrições geométricas. O coeficiente de atrito que você está considerando é f igual a

0,06, pois a embreagem é molhada, e a pressão máxima considerada é 1.500 kPa. Determine os valores para o diâmetro interno do disco, número de discos que a embreagem deve ter, bem como a força de acoplamento. Dica: para fazer a escolha inicial do raio interno, considere que este deve estar na seguinte faixa: $0,45r_o \leq r_i \leq 0,80r_o$.

Resolução da situação-problema

A partir do diâmetro externo limite de 90 mm, ou seja, $r_o = 45$ mm, fazemos a escolha de um raio interno. De acordo com a faixa sugerida, o valor mínimo é de 20,25 mm e o máximo igual a 36 mm. Vamos optar, portanto, por um valor de r_i igual a 28 mm.

$$T = \pi p_{\max} r_i f (r_o^2 - r_i^2) N$$

Em que:

T = torque.

f = coeficiente de atrito.

p_{\max} = pressão máxima.

r_o = raio externo.

r_i = raio interno.

N = número de discos (número inteiro par).

$$N = \frac{T}{\pi p_{\max} r_i f (r_o^2 - r_i^2)} = \frac{75}{\pi (1500)(0,028)(0,06)(0,045^2 - 0,028^2)} = 7,63 \text{ discos}$$

Aproximando, consideramos N igual a 8. No entanto, sabendo que os dois discos mais externos têm superfície de atrito em apenas um lado, serão necessários 9 discos nessa embreagem em questão.

$$T = Ff \left(\frac{r_o + r_i}{2} \right) N$$

Em que:

F = força de acoplamento.

f = coeficiente de atrito.

r_o = raio externo.

r_i = raio interno.

N = número de discos (número inteiro par).

Assim, temos que a força de acoplamento é:

$$75 = F(0,06) \left(\frac{0,045 + 0,028}{2} \right) 8$$

$$0,01752F = 75$$

$$F = 4281 \text{ N}$$

Dessa forma, definimos, em nosso projeto, uma embreagem de 9 discos, com diâmetro interno de 56 mm e força de acoplamento de 4.281 N.

Faça valer a pena

1. A embreagem é um dispositivo que conecta gradual e suavemente dois componentes rotativos, com velocidades angulares distintas, em relação a uma linha de centro comum, trazendo os dois componentes para uma mesma velocidade angular após seu acionamento. Os tópicos a seguir listam, de forma desordenada, os passos indicados de um projeto de embreagem:

1. Determine a distribuição de pressão sobre as superfícies de contato por atrito.
2. Caso a configuração não atenda às especificações operacionais e de confiabilidade, faça as alterações necessárias, por meio de um processo iterativo, até que todos os requisitos sejam atendidos.
3. Estime a energia dissipada como calor na zona de contato de atrito.
4. Determine a força de acionamento, torque de atrito e reações nos mancais e, em função desses valores, considerando o fator de segurança especificado, determine dimensões e faça a seleção dos materiais adequados.
5. Selecione o tipo de embreagem mais adequado à sua aplicação.
6. Determine o torque necessário para acelerar ou desacelerar o dispositivo.
7. Selecione o par de materiais de atrito considerando o modo de falha dominante, condições operacionais e tempo de resposta do acionamento.

Marque a sequência correta dos passos indicados de um projeto de embreagem:

- a) 4 - 7 - 6 - 2 - 1 - 5 - 3.
- b) 5 - 7 - 6 - 3 - 1 - 4 - 2.
- c) 5 - 6 - 7 - 4 - 1 - 3 - 2.
- d) 5 - 1 - 3 - 2 - 6 - 7 - 4.
- e) 4 - 3 - 5 - 7 - 1 - 6 - 2.

2. Os volantes atuam como um reservatório de energia cinética em máquinas girantes. Analise as informações apresentadas referentes às principais vantagens de projetos de volantes. Em seguida, classifique cada uma em verdadeira (V) ou falsa (F):

- () Aumento da amplitude de flutuação da velocidade.
- () Aumento do pico do torque motriz necessário.
- () Tensões reduzidas em eixos, acoplamentos e demais componentes do sistema.
- () Energia automaticamente armazenada ou retirada conforme a necessidade.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta do verdadeiro ou falso:

- a) V – V – V – V.
- b) V – F – V – F.
- c) F – F – F – F.
- d) F – F – V – V.
- e) F – V – F – V.

3. Um volante bem projetado apresenta como uma de suas principais vantagens a redução da amplitude da flutuação da velocidade. Considere um volante fabricado em ferro fundido com 60 polegadas de diâmetro interno e 56 polegadas de diâmetro externo. Para que opere de forma adequada, a velocidade angular do volante não deve variar mais do que de 240 rpm a 260 rpm.

Selecione a alternativa que indica corretamente o valor do coeficiente de flutuação de velocidade e o nível necessário de uniformidade de velocidade:

- a) 0,04 - grandes flutuações aceitáveis.
- b) 0,04 - alguma flutuação aceitável.
- c) 0,96 - flutuação moderada aceitável.
- d) 0,08 - alguma flutuação aceitável.
- e) 0,08 - flutuação moderada aceitável.

Referências

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., R. E.; DEWOLF, J. T. **Resistência dos materiais** – mecânica dos materiais. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

COLLINS, J. A.; BUSBY, H. R.; STAAB, G. H. **Projeto mecânico de elementos de máquinas**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

LOPES, A. V. M. **Projeto de um variador de velocidades escalonado sequencial de quatro marchas para aplicação no projeto baja SAE**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006409.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2019.

MOTT, R. L. **Elementos de máquinas em projetos mecânicos**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SILVA, A. *et al.* **Desenho técnico moderno**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

SILVA, G. B. L. M. da. **Projeto de um variador de velocidades escalonado tipo bloco deslizando para máquinas operatrizes**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007942.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2019.

ISBN 978-85-522-1466-3



9 788552 214663 >