

PROJETO MECÂNICO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS SEM 0568

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
SEM 0568 – PROJETO MECÂNICO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS
PLANO DE ENSINO - 1º SEMESTRE DE 2023
Prof. Dr. Jaime G. Duduch

I - CALENDÁRIO

I.1 – HORÁRIO: Segunda: 10h10min -12h/ Quarta: 10h10min-12h

I.2 - DIAS LETIVOS

Fevereiro	--	--	--		--	--
Março	--	13/15	20/22		27/29	--
Abril	--	10/12	17/19		24/26	--
Maio	--/03	08/10	15/17		22/24	29/31
Junho	05/07	12/14	19/21		26/28	--
Julho	03/05	10/12	--		--	--
semana da SEMATRON não haverá aula						

I.3 – EXERCÍCIOS PARA NOTA E PROVA

1º Exercício:..... 26 de abril
2º Exercício:..... 03 de maio
3º Exercício:..... 31 de maio
4º Exercício:..... 28 de junho
PROVA.....12 de julho
PROJETO FINAL.....15 de julho

II - CRITÉRIO DE APROVAÇÃO

MÉDIA = 0,4 (nota do projeto) + 0,2 (média dos exercícios) + 0,4 (nota da prova)

CRITÉRIO DE APROVAÇÃO $M \geq 5,0$

III - EMENTA

1. Noções básicas sobre projetos: Importância. Fases de um projeto. Qualidade e custos. Algumas regras de bem projetar. Noções de normalização, economia, confiabilidade e eficiência.
2. Fadiga de materiais: Teoria básica de fadiga. Diagrama de Wöhler (Curva S-N). Coeficiente de variação da solicitação. Diagrama de Smith, de Goodman, de Soderberg e de Gerber. Tensão admissível de resistência à fadiga.
3. Eixos: Projeto e fabricação de eixos. Cálculo de eixos (resistência mecânica, fadiga e flecha admissível). Velocidade crítica de eixos.
4. Uniões eixo/cubo e eixo-eixo: Teoria e Dimensionamento.
5. Noções básicas de uniões (parafusos, rebites, soldas): vantagens e desvantagens.
6. Elementos de movimento linear: parafuso de movimento, fusos de esferas recirculantes.
7. Mancais de rolamento (utilização, tipos e seleção).
8. Transmissões por engrenagens: Tipos. Propriedades. Aplicações. Vantagens e desvantagens. Cálculos de dimensionamento.
9. Transmissões flexíveis: Tipos (correias e correntes). Propriedades. Aplicações. Vantagens e desvantagens. Noções básicas.
10. Molas mecânicas

IV - BIBLIOGRAFIA

- [1] COLLINS, J.A.: Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas. LTC. John Wiley & Sons. 2006.
- [2] JUVINALL, R.C.; MARSHEK, K.M.: Fundamentos do projeto de componentes de máquinas. Ed: LTC. 2006.
- [3] MASSAROPPI JR, E.; LIRANI, J.: Exercícios de Elementos de Máquinas, EESC-USP, 2000
- [4] MOTT, R. L.: Machine elements in mechanical design. 5th edition. Editora: Pearson. 2014.
- [5] NIEMANN, G. “Elementos de Máquinas”, vols. I, II e III, Editora Edgard Blucher, 1991.
- [6] NORTON, “Elementos de Máquinas”, Prentice Hall. 2002.
- [7] Notas de Aulas – disponibilizados em formato PDF
- [8] **SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R.G.: Projeto de Engenharia Mecânica. Ed: Bookman. 2006.**
- [9] SKF - Catálogo de Rolamentos, 1989.

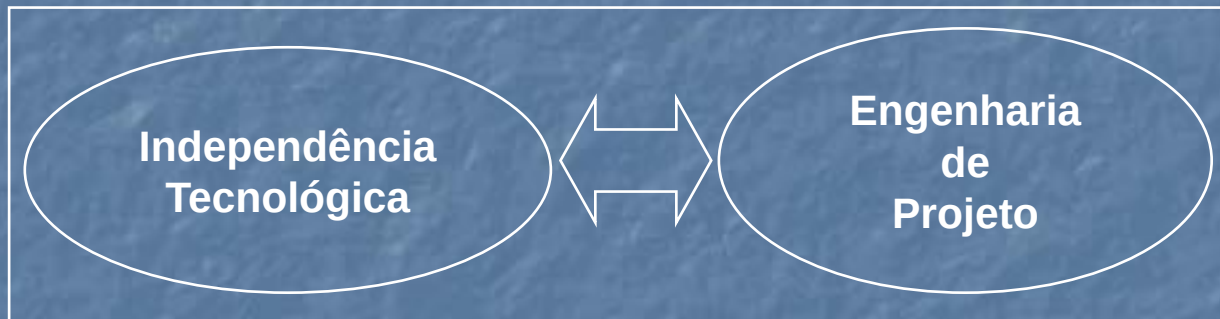
O material usado para apresentação das aulas, possíveis gravações, exercícios, projeto final e qualquer outro tipo de comunicação será feita pelo e-disciplinas.

AULA 1 - Introdução, Noções de Projetos Mecânicos

Prof. Dr. Jaime Duduch

1. Noções básicas sobre desenvolvimentos de projetos

1.1 A importância do projeto



	material	projeto
Handheld	20%	80%
Software	0%	100%
Navio	70%	30%

■ Definição de PROJETO

É o cérebro batendo em pedaços de ferro, metais, e cristais para que eles façam o que você deseja que eles façam.

O que é

Design < de + signãre = marcar.

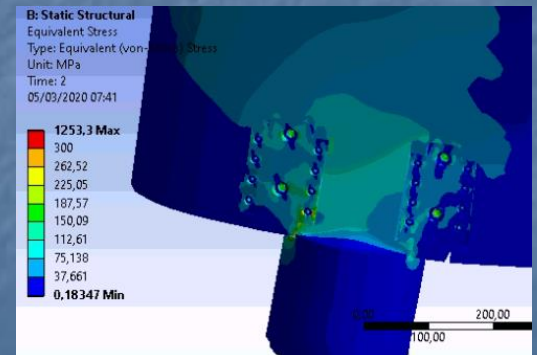
- Criar algo que nunca existiu
- Arranjar coisas existentes de maneira a satisfazer uma necessidade da sociedade.
- O Projeto estabelece e define soluções de problemas nunca resolvidos, ou novas soluções de problemas que já foram resolvidos de outra maneira.
- É um processo criativo que inclui a síntese de muitas disciplinas.
 - ✓ é um processo inovador e altamente iterativo;
 - ✓ é também um processo de **tomada de decisões**;
 - ✓ multidisciplinar

O que é projeto?

- Projeto é uma atividade sequencial;
 - Exploração de sistemas alternativos
 - Formulação de modelos matemáticos
 - Especificação de componentes
 - Seleção de materiais

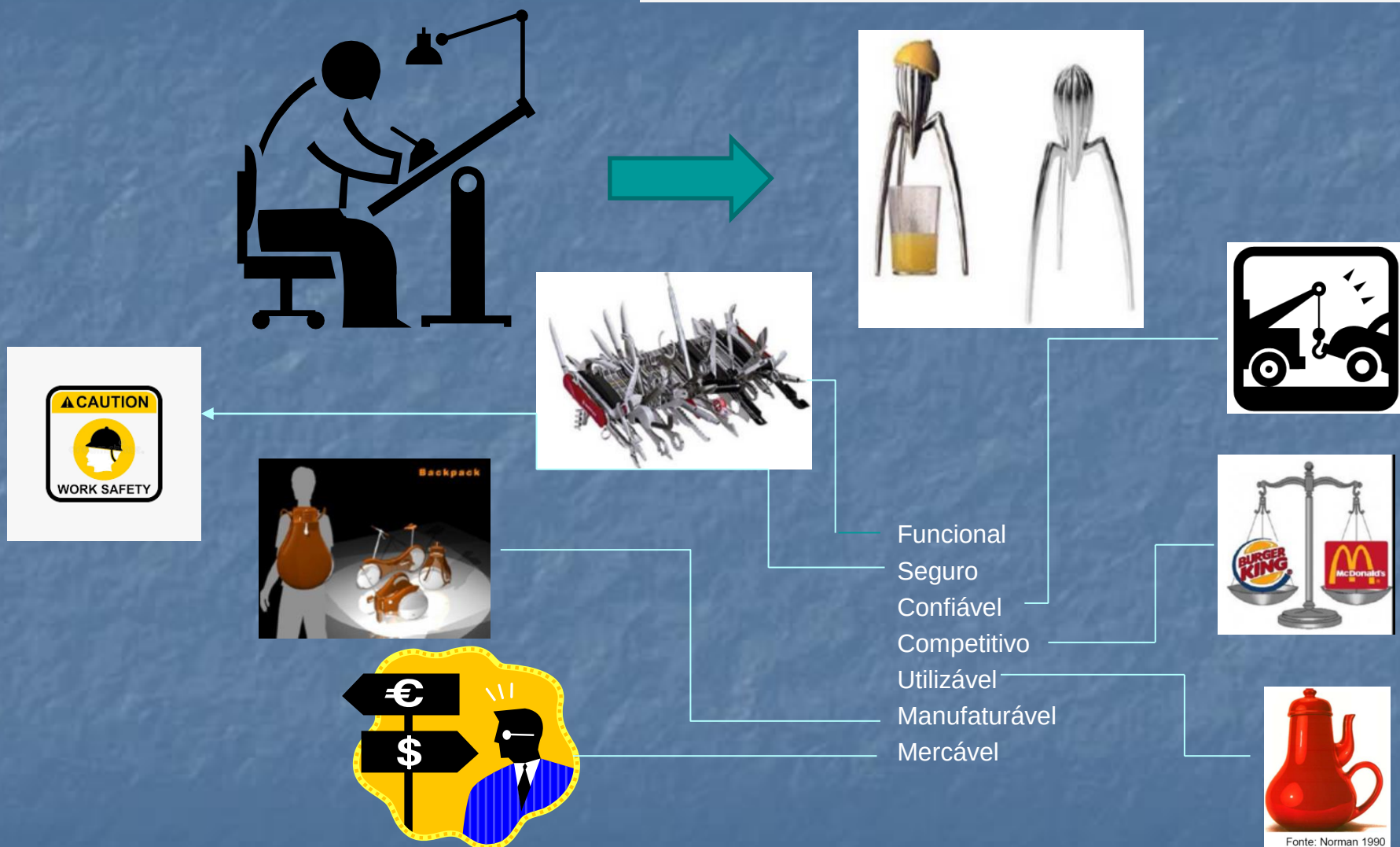


O Projeto mecânico é uma propriedade intelectual que exige: observação, criatividade, inteligência, atualização, domínio das ferramentas computacionais e de cálculos. Atualmente o engenheiro conta com as poderosas tecnologias computacionais (CAE-CAD-CAM) e da informação (Internet, banco de dados). Erros e incertezas são intrínsecos ao projeto. As ferramentas computacionais auxiliam muito na redução deles, *mas*, mesmo assim, é fácil construir modelos computacionais com *erros*. Pode ser fácil corrigi-los, desde que se conheça como fazê-lo.



PROJETO

Espremedor Juicy Salif, de 1990. Criação de Philippe Starck para a empresa italiana Alessi.



PROJETO



O poder de sedução do design de alguns objetos materiais e virtuais pode transcender questões de preço e desempenho tanto para compradores quanto para usuários. Para decepção de muitos engenheiros, a aparência de um produto pode às vezes causar o sucesso ou o fracasso da reação do mercado. O que esses objetos têm em comum é a capacidade de criar um laço emocional com os públicos, quase uma necessidade para eles.

<http://www.revistacliche.com.br/2013/08/o-design-que-te-seduz/>

Morfologia do processo de projeto

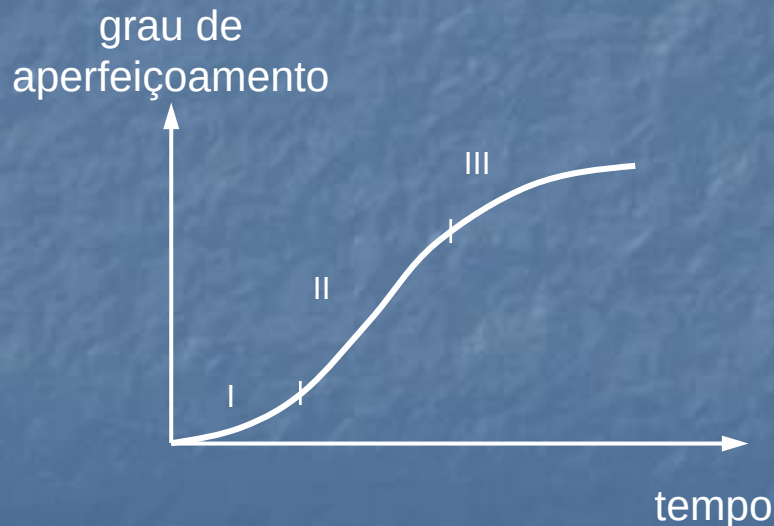
A abordagem científica e temática de projeto, sua organização e métodos começaram a ser estudadas e interpretadas a partir dos **anos 50**, e deve-se ao grande progresso tecnológico obtido durante e decorrente da segunda guerra mundial.

- São representações **filosóficas e estratégicas** para a condução de um projeto e que podem ser classificados em **modelos prescritivos, descritivos e computacionais**. ASIMOW 1968, EVBUOMWAN et al. 1996.

- À medida que um projeto é iniciado e desenvolvido, desdobra-se uma sequência de eventos em ordem cronológica, formando um **modelo comum a outros projetos**. ASIMOW 1968

1.2 Desenvolvimento dos projetos

- Basear-se no que já existe;
- Alterar pontos fracos
- Engenharia reversa



JAPÃO:

Anos 50: Indústria arrasada pela guerra

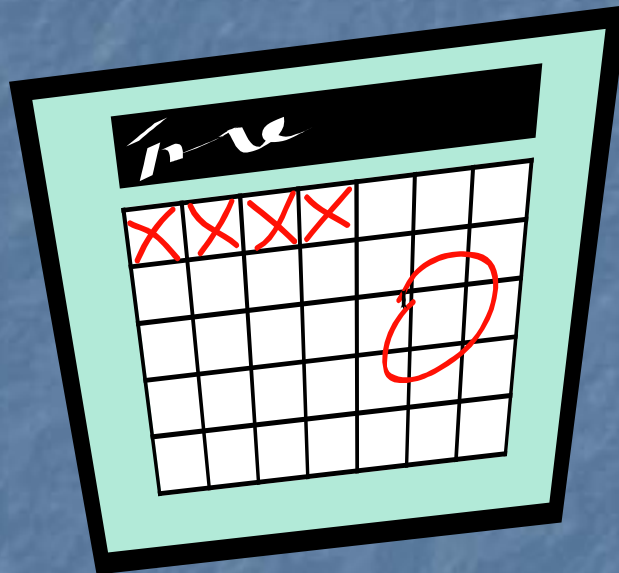
Anos 60: Produtos similares → custo ↑, qualidade ↓

Anos 70: Produtos similares → custo ↑, qualidade ↑

Anos 80: Produtos avançados → custo ↓, qualidade ↑

Anos 90: Liderança

1.3 Fases de um projeto





1. Reconhecimento de uma necessidade

- Necessidades geralmente surgem de uma insatisfação

- > Reduzir o custo
- > Aumentar a confiabilidade/eficiência
- > Mudar

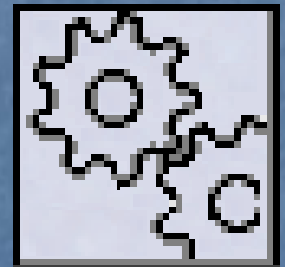


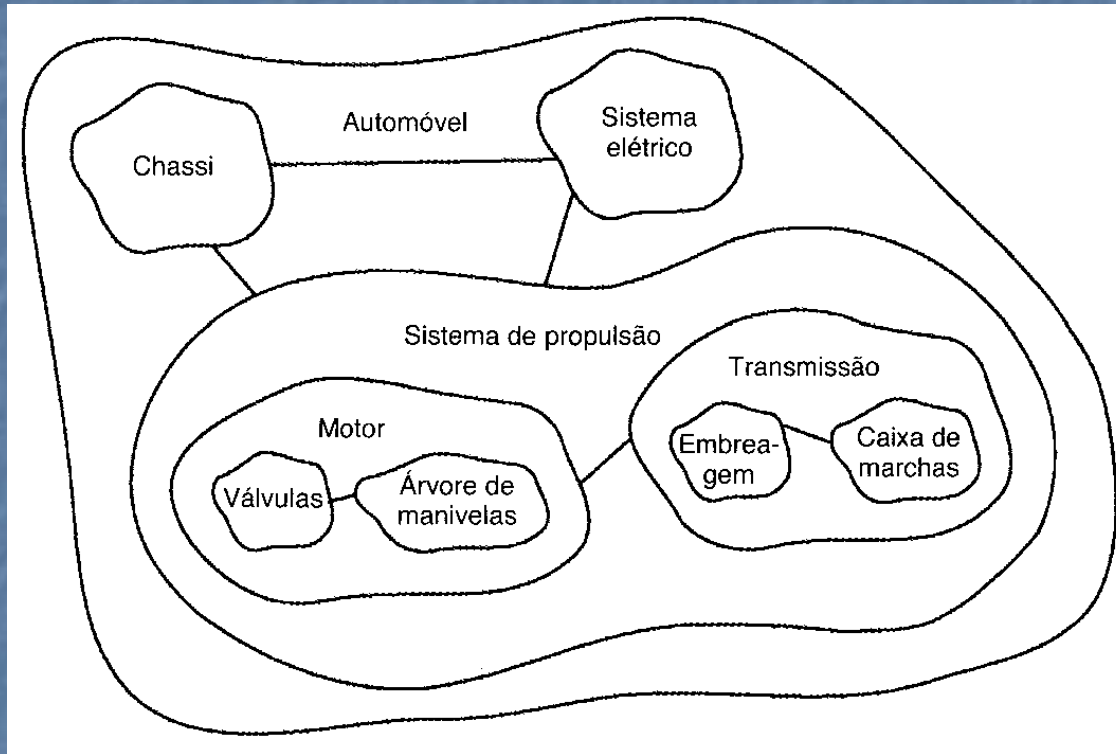
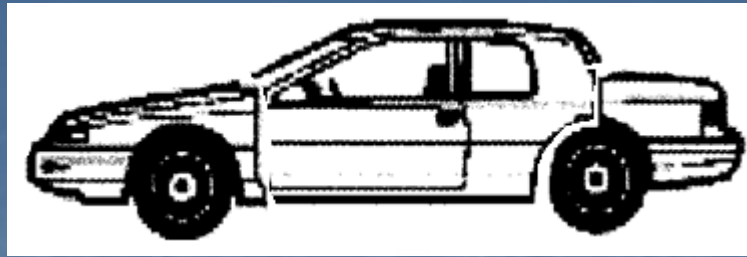


2. Definição do problema

- A definição de um problema inclui:

- > Apresentação do problema
- > Objetivos e metas
- > Definições de termos técnicos
- > Restrições
- > Critérios de avaliação



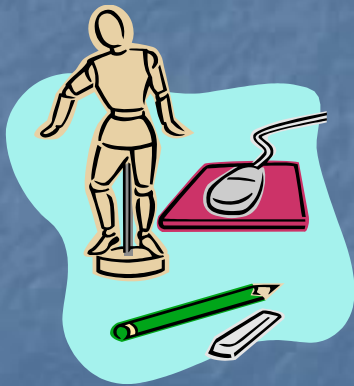




3. Análise e formulação do problema

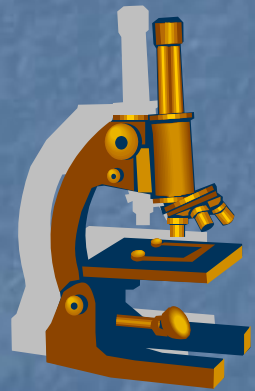
- Para projetar algo:

- > Use a disciplina apropriada da ciência

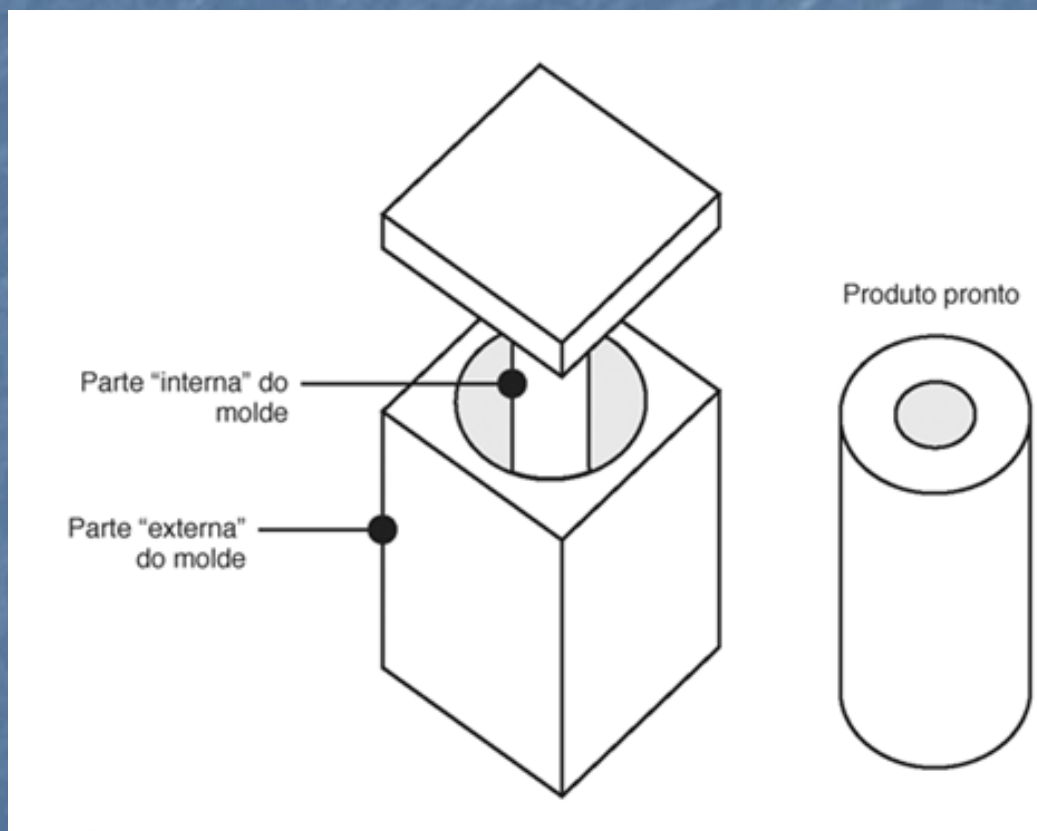


- Escolha as ferramentas

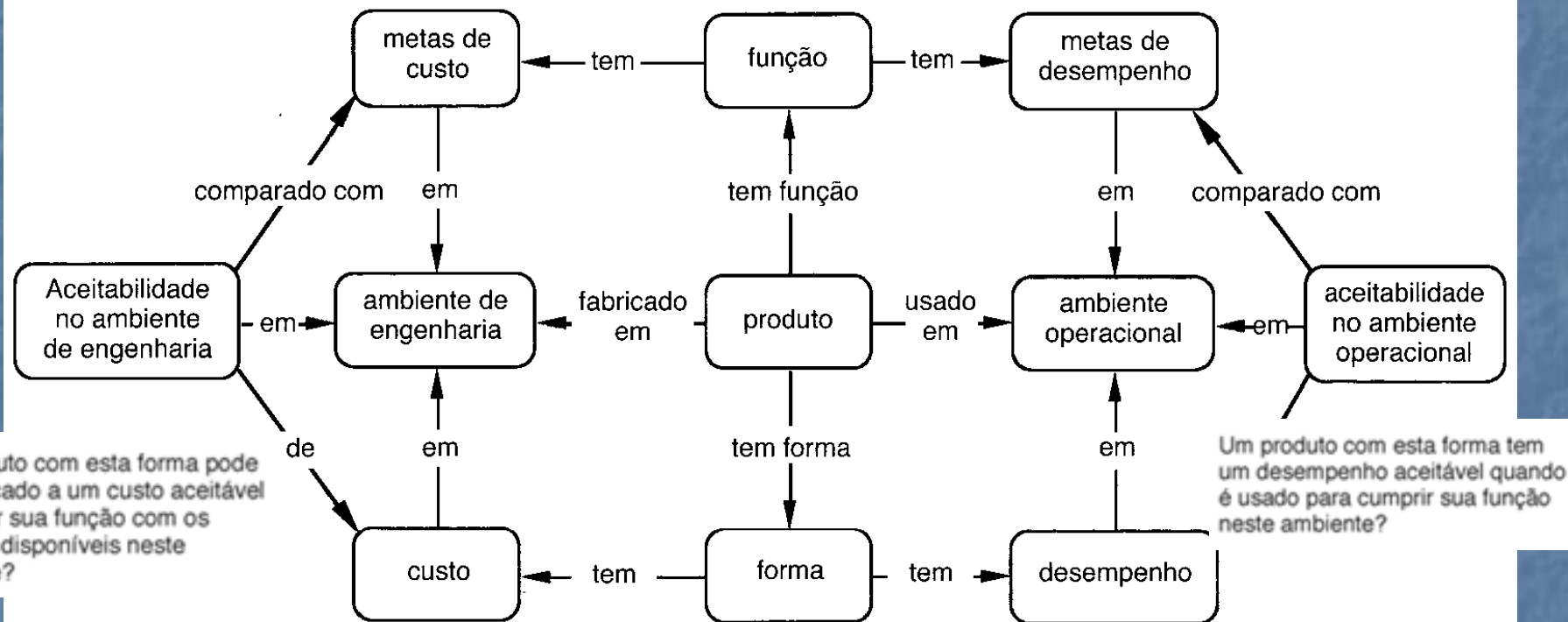
- > Simplifique através de modelos



Forças que moldam um projeto



Para que um produto seja aceitável, deve atender às metas de custo e desempenho



- as pessoas envolvidas no projeto e fabricação do produto;
- as ferramentas e métodos usados no projeto;
- os materiais e tecnologia disponíveis;
- as fábricas e meios de produção.

- as condições socioeconômicas, como financiamentos, códigos de construção, normas ambientais, normas de fabricação e operação, e hábitos e costumes locais;
- o modo como as pessoas interagem com o produto; por exemplo, a forma como operam e consertam o produto;
- o modo como outros produtos podem interagir com ele; por exemplo, o motor e a transmissão de um automóvel.



4. Literatura

- > Biblioteca
- > *Internet*
- > Relatórios Técnicos [R&D]
- > Relatórios de Empresas
- > *Journals*
- > Patentes
- > Catálogos
- > Manuais etc.





5. Estudo da viabilidade

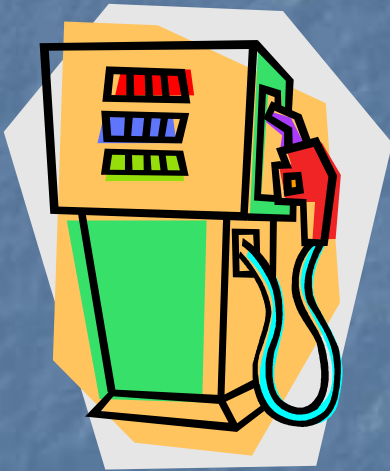
- Avaliação das soluções,
 - > Factibilidade tecnológica
 - > Factibilidade física
 - > Vantagem econômica
 - > Viabilidade financeira





6. Projeto Preliminar

- Não corra detalhando o projeto !..
- Divida o sistema em blocos funcionais.
- "checklist";

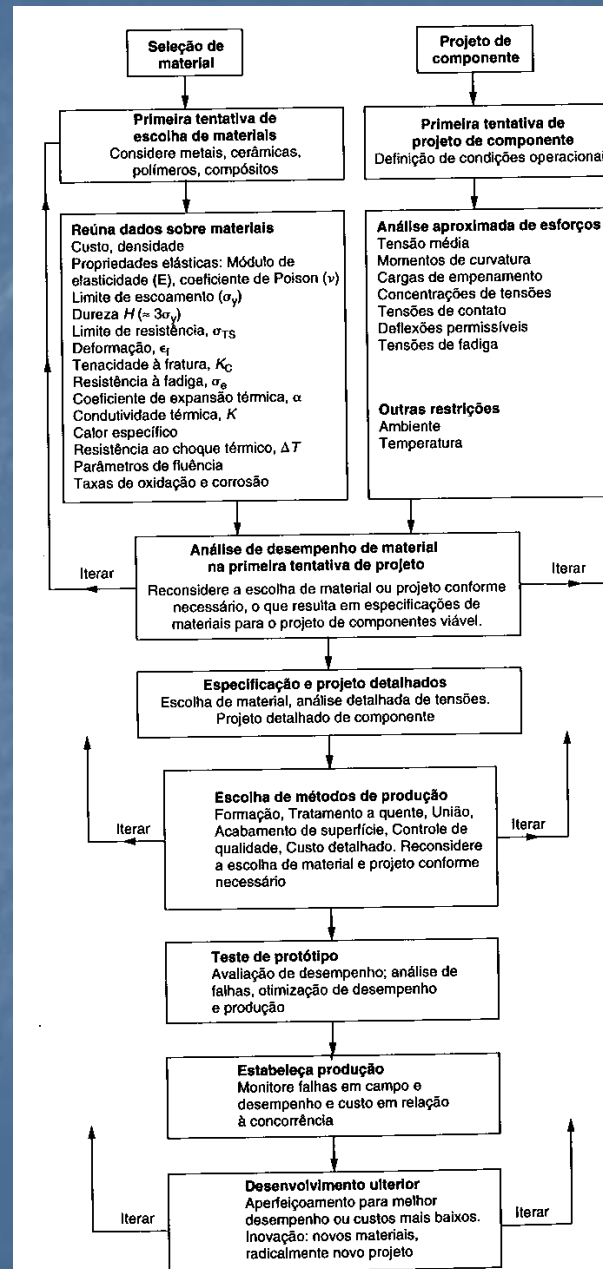


- > Função
- > Resistência
- > Estética
- > Energia
- > Segurança
- > Viabilidade etc.

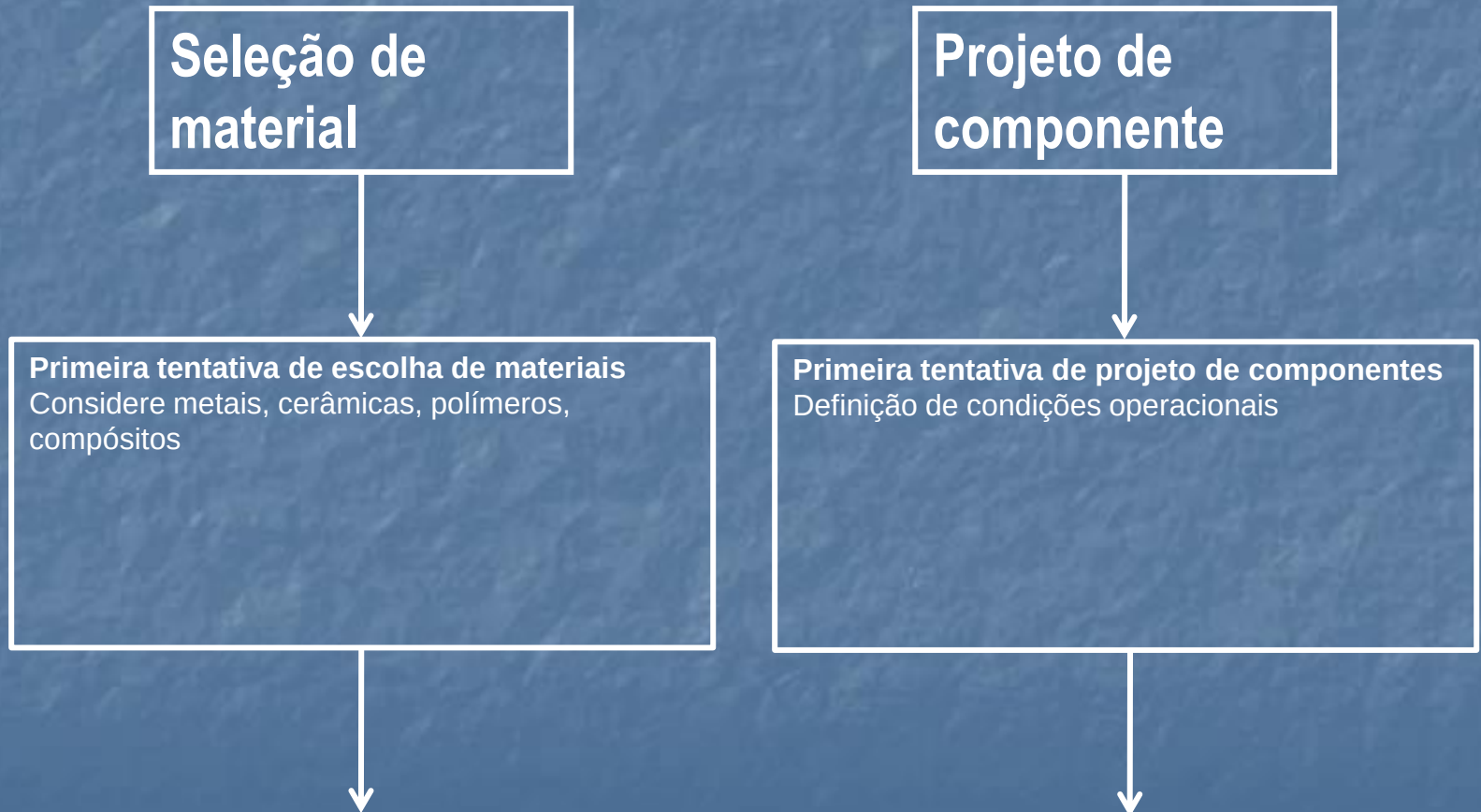
-A partir daqui alterações tornam-se extremamente caras



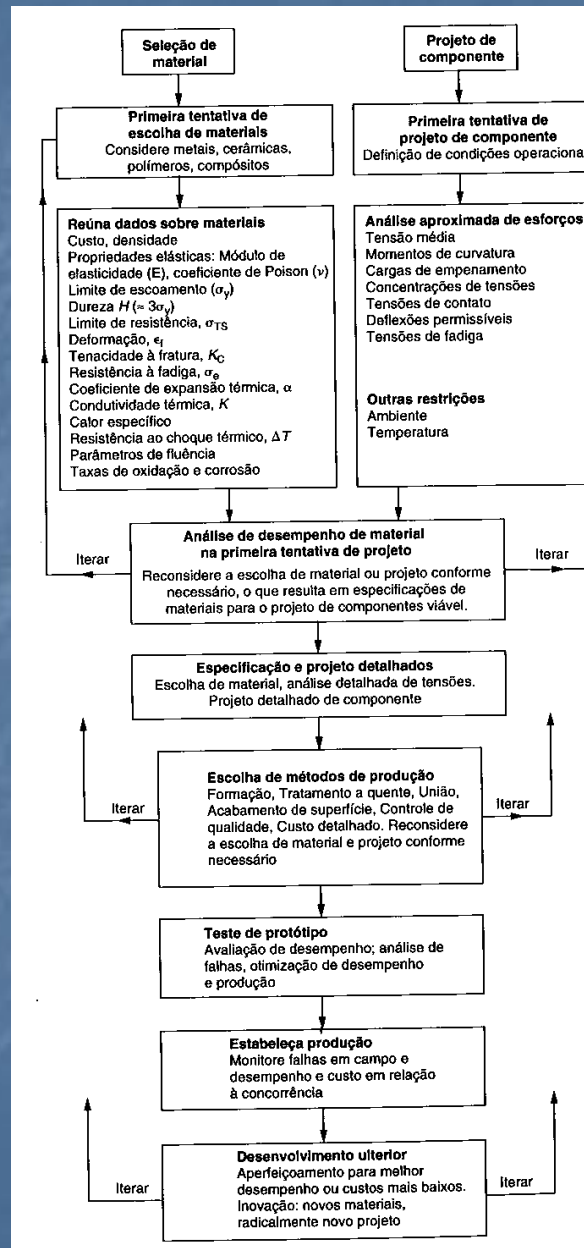
Metodologia de Projeto



Metodologia de Projeto



Metodologia de Projeto



Metodologia de Projeto

```
graph TD; A[Metodologia de Projeto] --> B[Reúna dados sobre materiais]; A --> C[Análise aproximada dos esforços]; B --> D[ ]; C --> E[Outras restrições];
```

Reúna dados sobre materiais

Custo, densidade
Propriedades elásticas: Módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν)
Limite de escoamento (S_y)
Dureza H ($\approx 3 S_y$)
Limite de resistência, S_{ut}
Deformação, ϵ
Tenacidade à fratura, K_c
Resistência à fadiga, S_e
Coeficiente de expansão térmica, α
Condutividade térmica, K
Calor específico, c
Resistência ao choque térmico
Parâmetros de fluência
Taxas de oxidação e corrosão

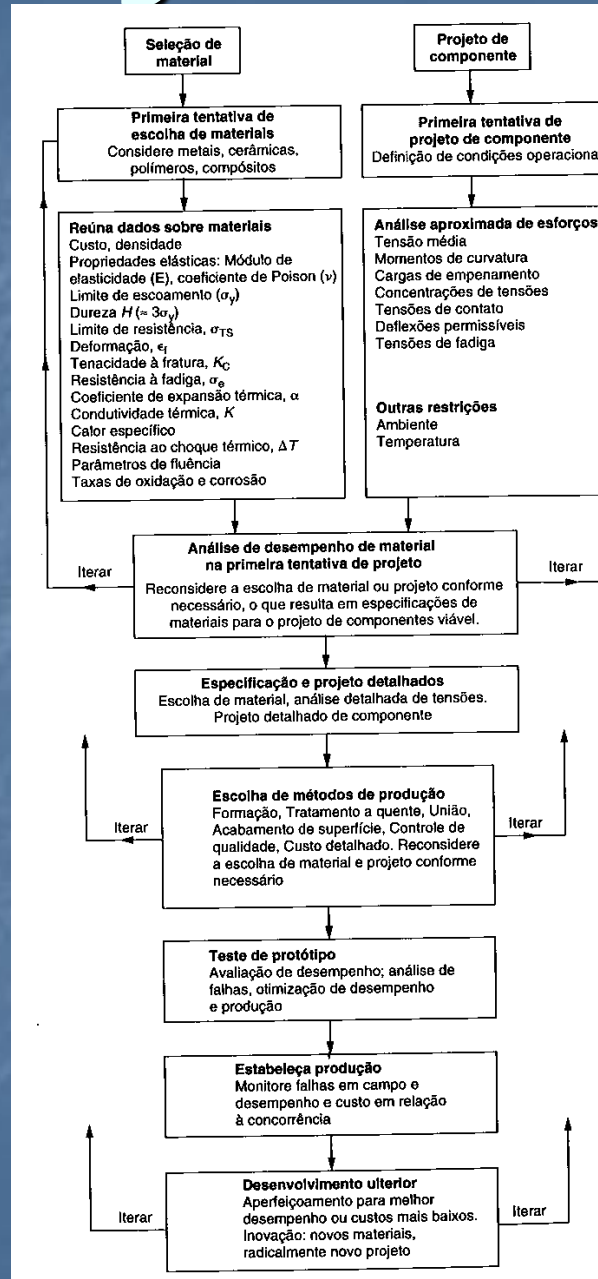
Análise aproximada dos esforços

Tensão média
Momentos de curvatura
Cargas de empenamento
Concentrações de tensões
Tensões de contato
Deflexões permissíveis
Tensões de fadiga

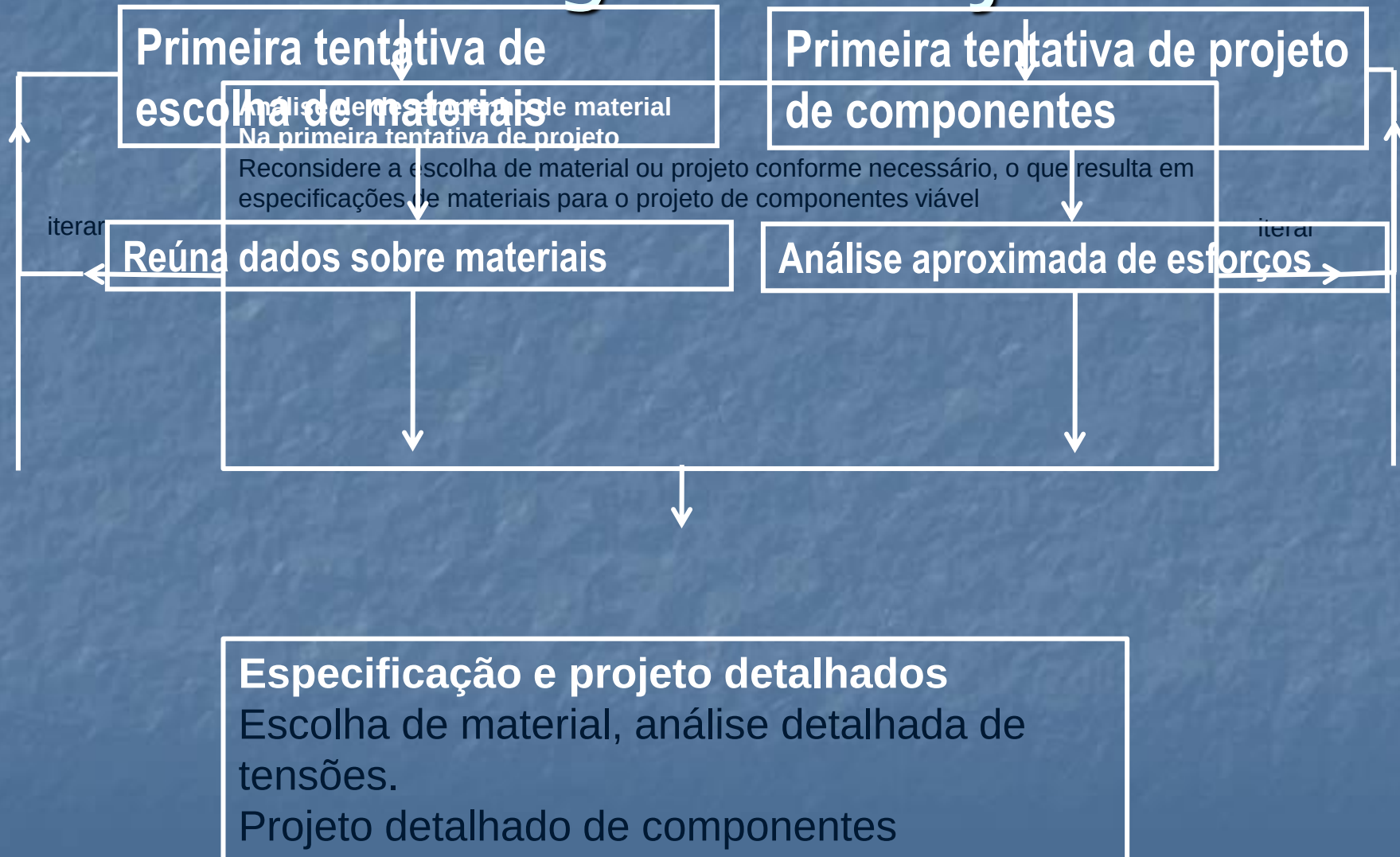
Outras restrições

Ambiente
Temperatura

Metodologia de Projeto



Metodologia de Projeto



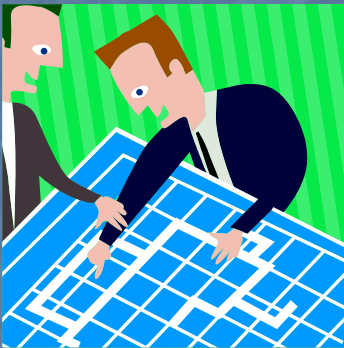


7. Detalhamento do Projeto

■ Para cada bloco funcional;

> Forma & Dimensões

> Tolerâncias & Propriedades Superficiais



> Materiais

> Processos de fabricação

> Decisões comerciais

> Marketing & Serviços

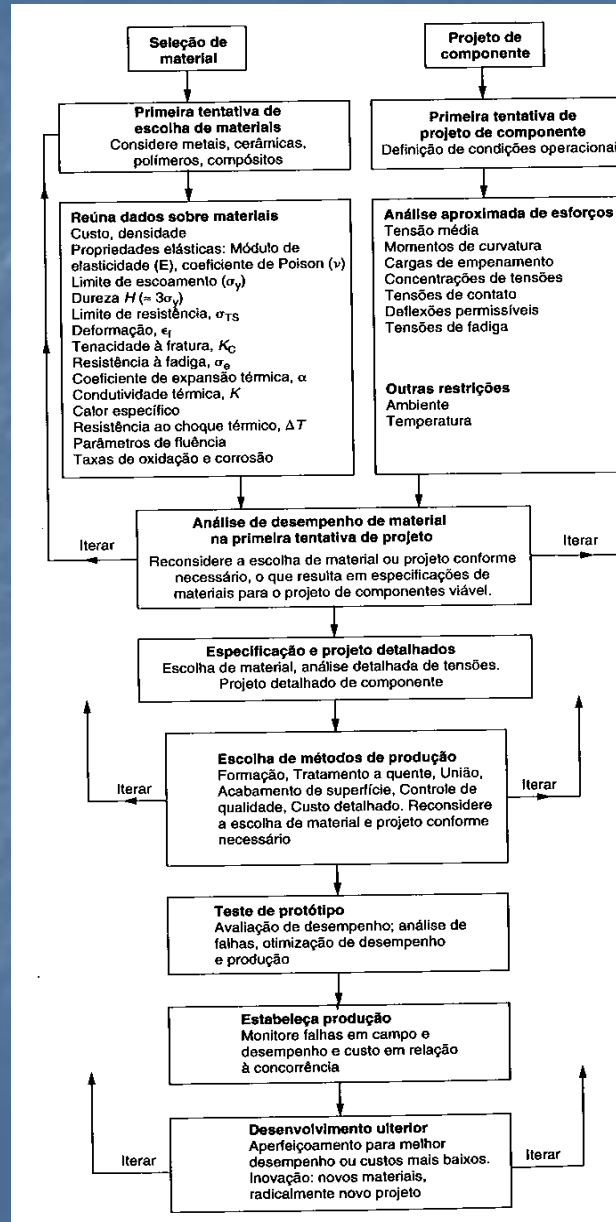
> Descarte & Vida útil

> Melhorias

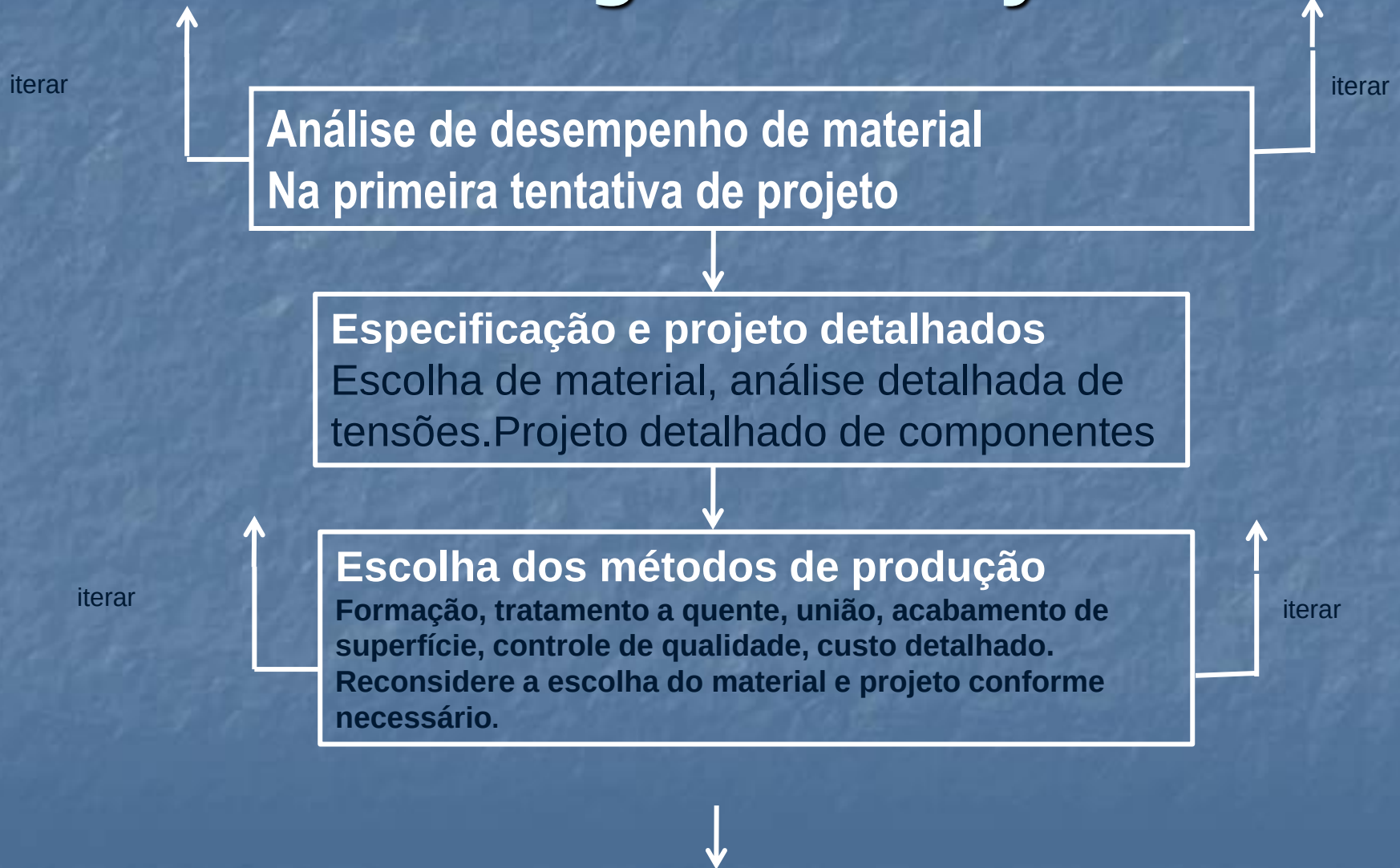


> Resultado: Modelos & Desenhos Técnicos

Metodologia de Projeto



Metodologia de Projeto





8. Avaliação

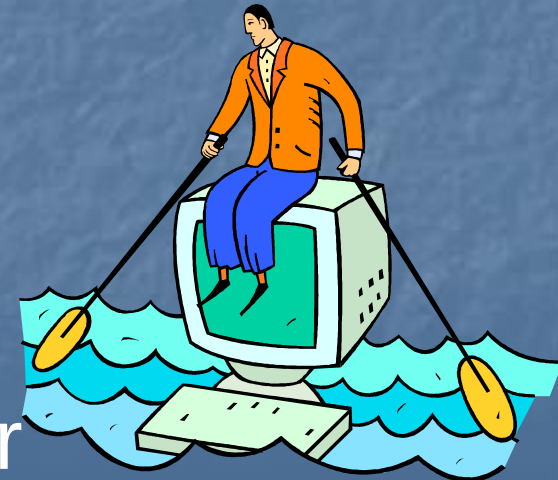
> Técnicas de testes virtuais

- Integração de computadores no projeto e processo de fabricação
- CAD / CAM / CAE
- Simulação, Animação, Análise FEM



> Construção de protótipos e testes usando técnicas de laboratório

- Fácil, barato, fácil de revisar



Metodologia de Projeto

```
graph TD; A[Metodologia de Projeto] --> B[Escolha dos métodos de produção<br/>Conformação, tratamento a quente, união,<br/>acabamento, controle de qualidade, custo<br/>detalhado. Reconsidere a escolha do<br/>material e projeto conforme necessário.]; B --> C[Teste de protótipo<br/>Avaliação de desempenho;<br/>análise de falhas, otimização<br/>de desempenho e produção]; C --> D[Estabeleça a produção<br/>Monitore falhas em campo e desempenho e<br/>custo em relação à concorrência]; B -- iterar --> A; C -- iterar --> B;
```

Escolha dos métodos de produção

Conformação, tratamento a quente, união, acabamento, controle de qualidade, custo detalhado. Reconsidere a escolha do material e projeto conforme necessário.

Teste de protótipo Avaliação de desempenho; análise de falhas, otimização de desempenho e produção

Estabeleça a produção

Monitore falhas em campo e desempenho e custo em relação à concorrência

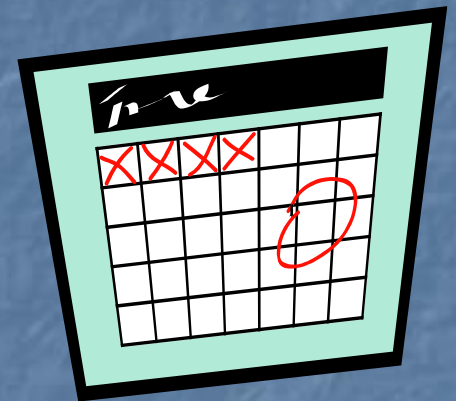


9. Planejamento da Produção



■ Muito planejamento precisa ser feito.

- > Planejamento de vendas
- > Planejamento a longo prazo
- > Gerenciamento de demanda
- > Planejamento de necessidade de materiais
- > Relações com os consumidores





10. Manufatura

- That is the point where the rubber meets the road !..



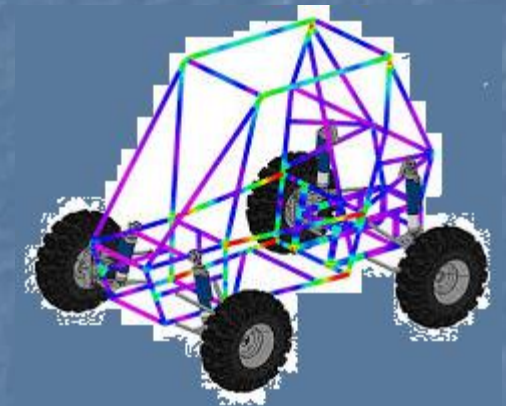
References

- Dieter, George E., Engineering Design, A Materials and Processing Approach
- <http://www.cetex.de/cetex/eng/ausstat.htm#gv>
- <http://www.sapgenie.com/sapfunc/pp.htm>
- <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/buildall/key/key1904.html>

1.4 Aplicativos de CAE

a.Método dos Elementos Finitos

- Tensões e deformações nas peças
- Frequências naturais (ressonâncias) e modos de vibrar
- Transmissão de calor
- Escoamentos de fluidos
- Campos elétricos e magnéticos
- etc

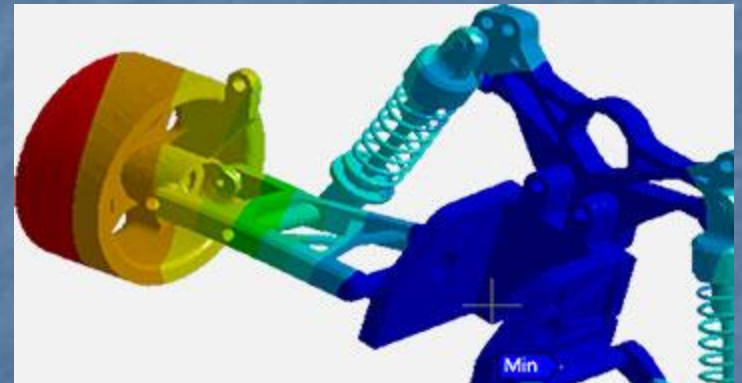


b.Modelagem de sólidos

- Construir figuras 3D
- Gerar malhas de Elementos Finitos

c.Propriedades de sólidos

- Massa
- Áreas
- Volume
- Centro de Gravidade
- Momentos de inércia



d. Projeto de tubulações

e. Cinematismo de sistemas

- Trajetória de robôs
- Cálculo de folgas e colisões

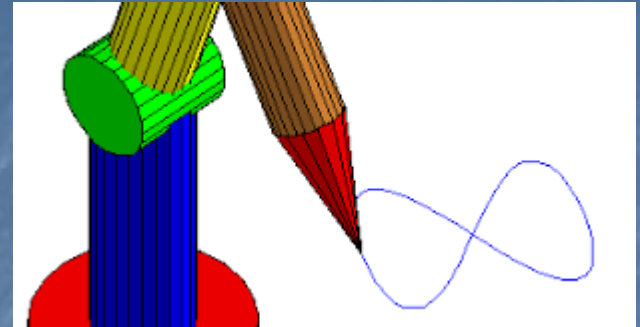
f. Projeto de matrizes para injeção de plástico

- Projeto de cavidade
- Controle das variáveis do processo
- Projeto do estampo

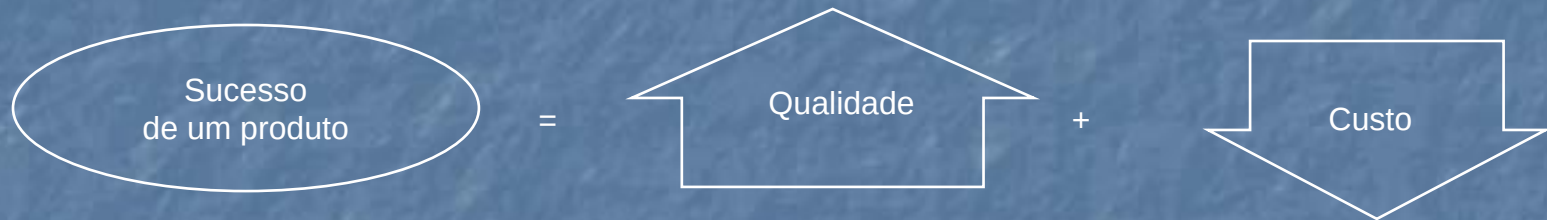
g. Projeto de placas de circuitos impressos

h. Projeto estrutural arquitetônico

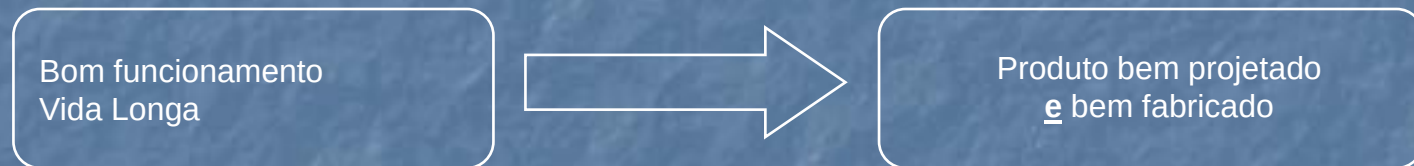
i. Automação de cálculos e dimensionamento



1.5 Qualidade e custos



- Qualidade de projeto:
"Produto obedece especificações de projeto"
- Qualidade de fabricação:
"Peças obedecem especificações de desenho"



Custo de projeto

Custo de fabricação



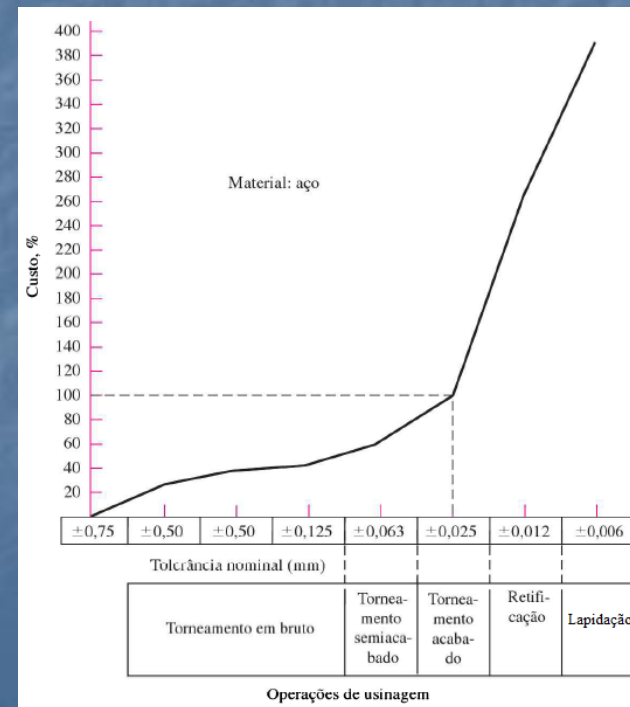
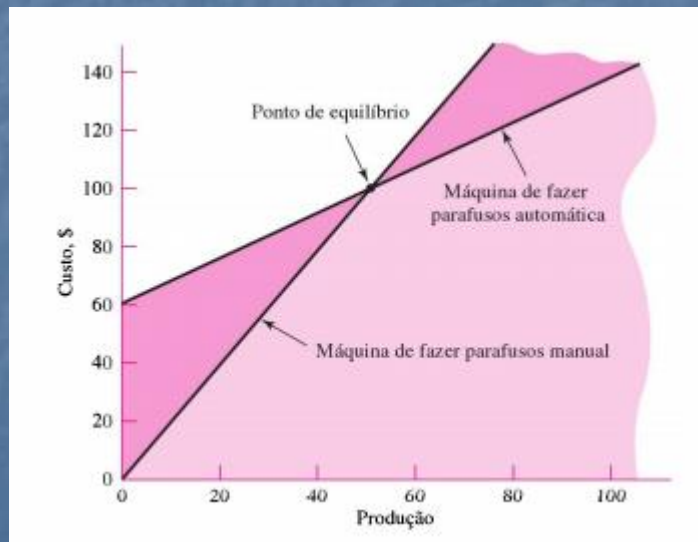
Preço de venda

Custo de operação

Custo de manutenção

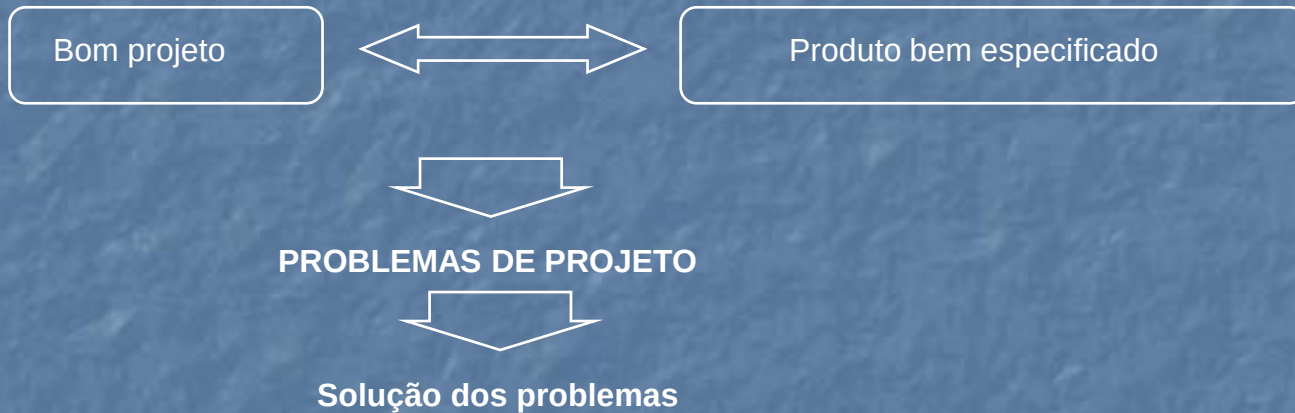


Custo operacional



Custo versus tolerância/
processo de usinagem.
(Extraído de David G.
Ullman, The Mechanical
Design Process, 3. ed.,
Nova York: McGraw-Hill,
2003.)

1.6 Solução dos problemas de projeto



- a) Localizar bem os problemas
O que é importante para a peça / produto funcionar bem

EXEMPLO: Identificar superfícies/partes funcionais e acessórias

Exemplos de superfícies funcionais:

- Superfícies que transmitem força / momento
- Assento de rolamentos
- Guias de movimento relativo
- Superfícies de posicionamento
- Superfícies de vedação e/ou lubrificação

b) Identificar o tipo de problema:

Problema de : {
- projeto
- fabricação
- especificação
- etc.



c) Fazer perguntas adequadas:

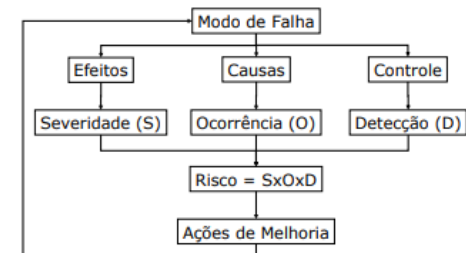
- Como os concorrentes solucionam?
- Quais objetivos não foram alcançados?

• Qual a solução mais : {
Fácil?
Barata?
Correta?

d) Analisar várias alternativas

- “Brain Storm”
- Listar todas as soluções possíveis
- Dar notas e escolher
- técnica de Quality Function Deployment (QFD)

Failure Mode and Effects Analysis

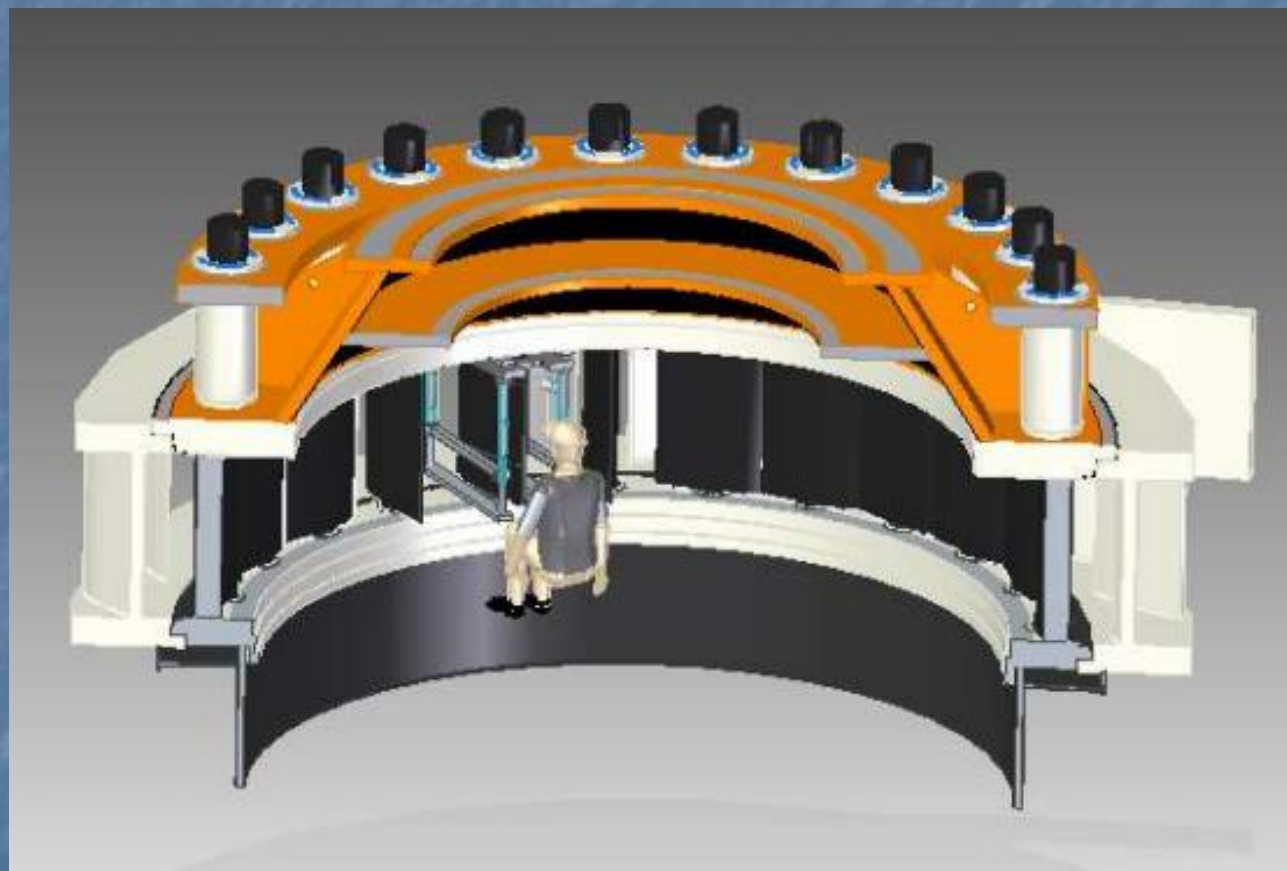


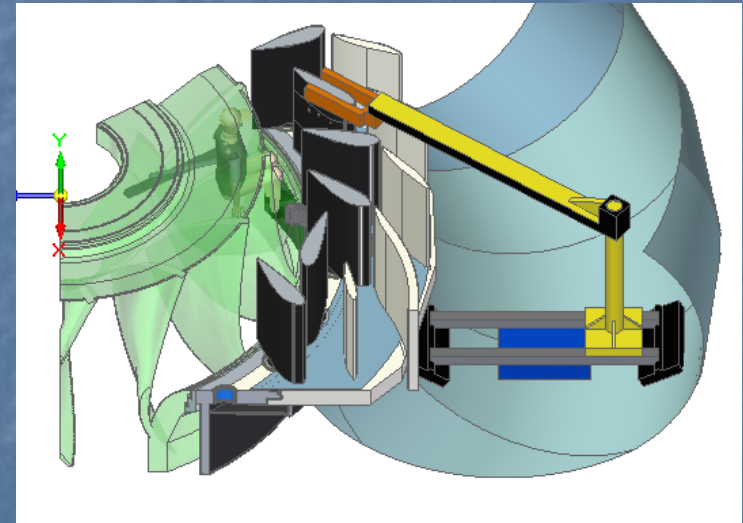
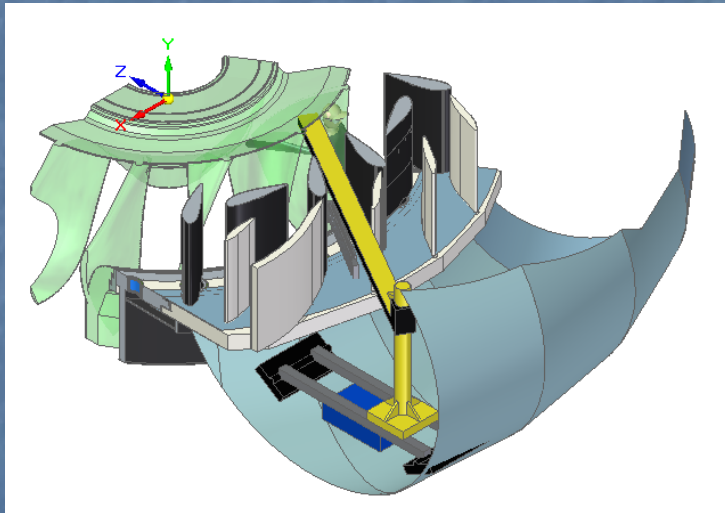
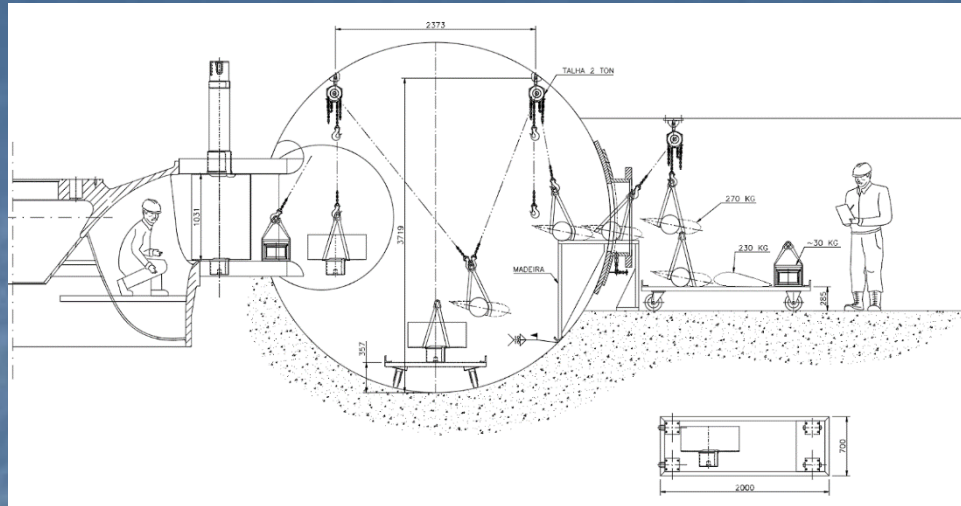
CARPINETTI, L. C. R. **Gestão de qualidade: conceitos e técnicas**, 3ª ed., São Paulo: Atlas, 2016.

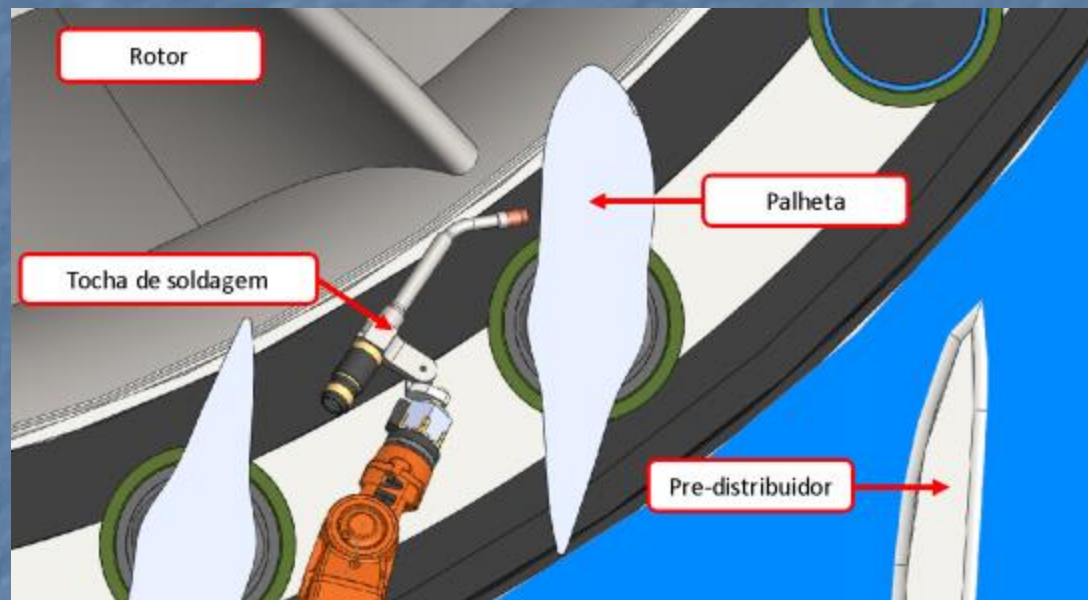
e) FMEA

- modernamente aplica-se também Failure Mode and Effects Analysis. Esta técnica e a de QFD (Quality Function Deployment) são ferramentas de Engenharia de Produção aplicados ao projeto de produtos

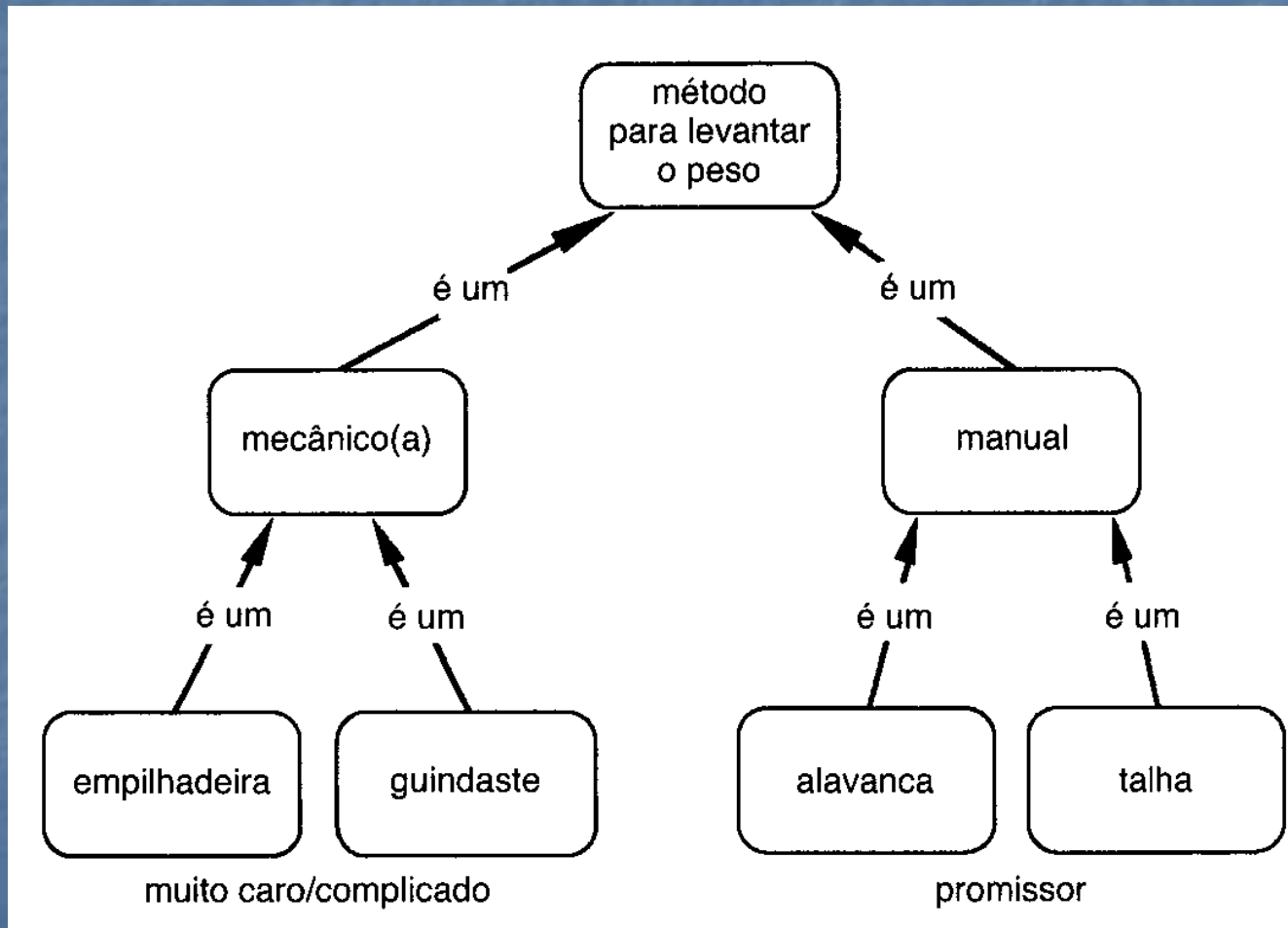
Técnicas e exemplos



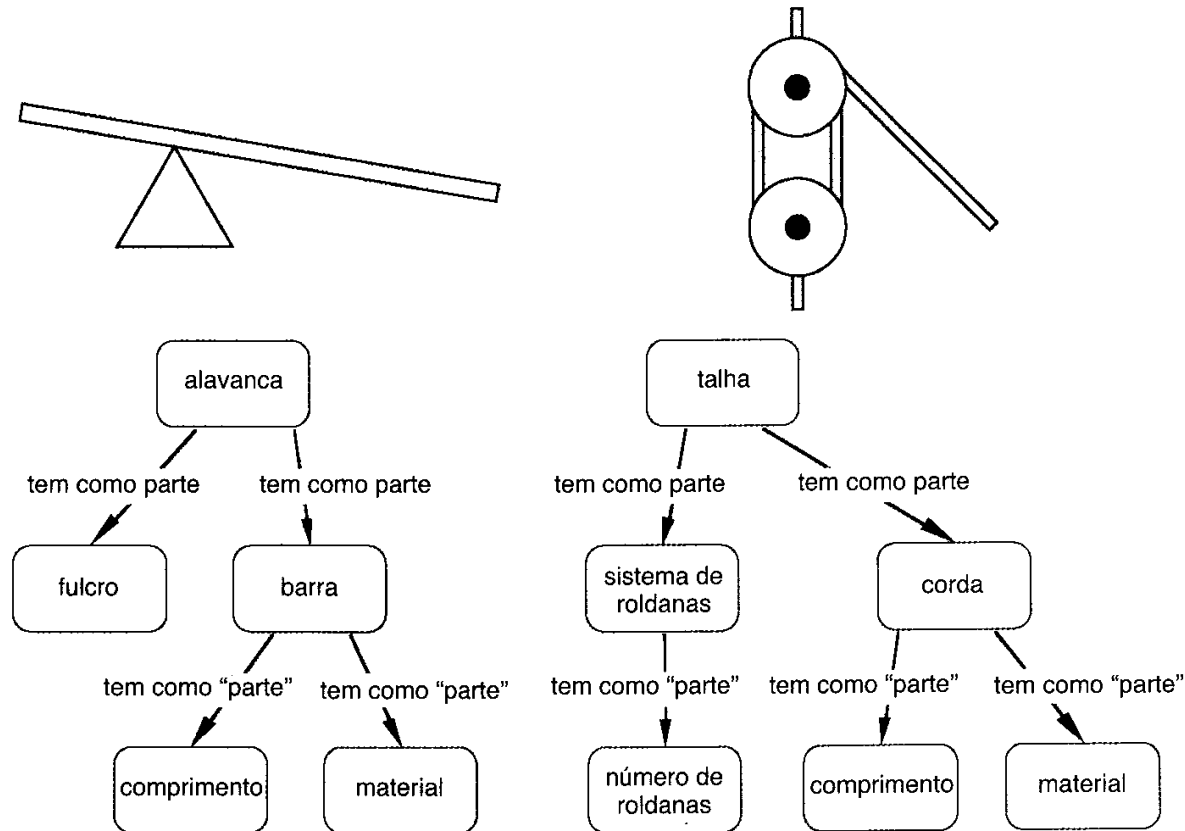




Hierarquia de classes: “é um” Síntese

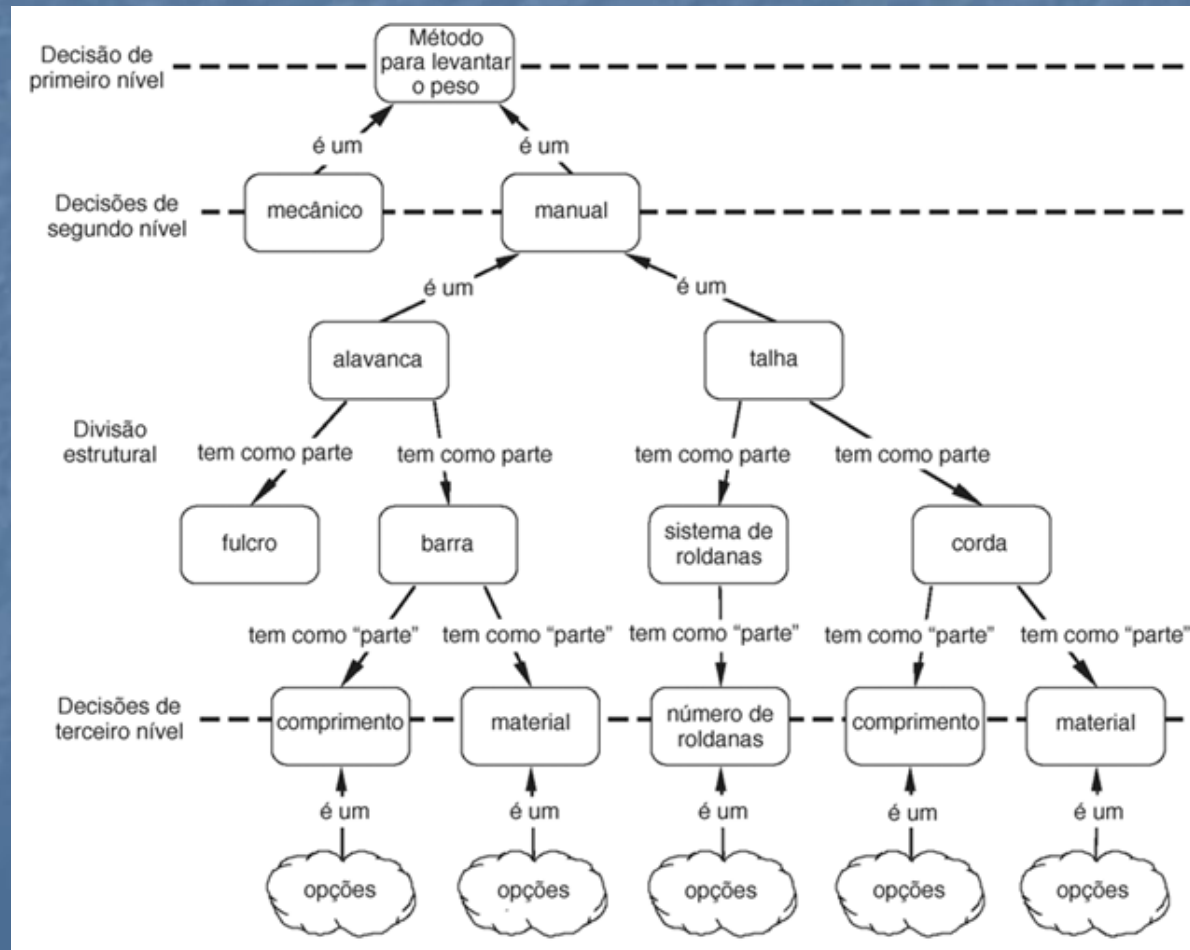


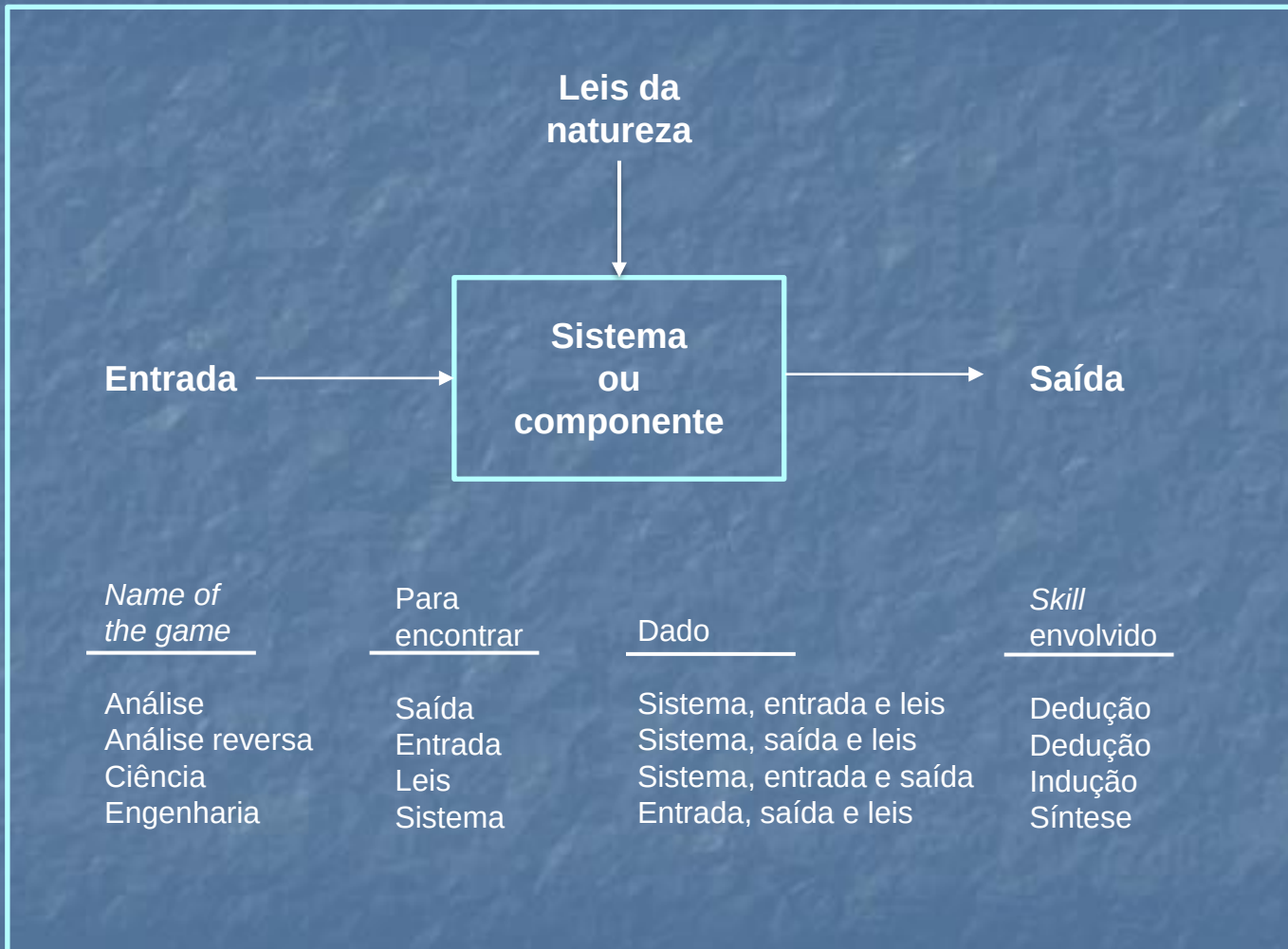
Hierarquia estrutural: “tem como parte” Análise



Hierarquia estrutural dos dois métodos manuais de levantamento.

Mapa conceitual: hierarquia de decisões "é um" + hierarquia de componentes "tem como parte"





Geração de ideias

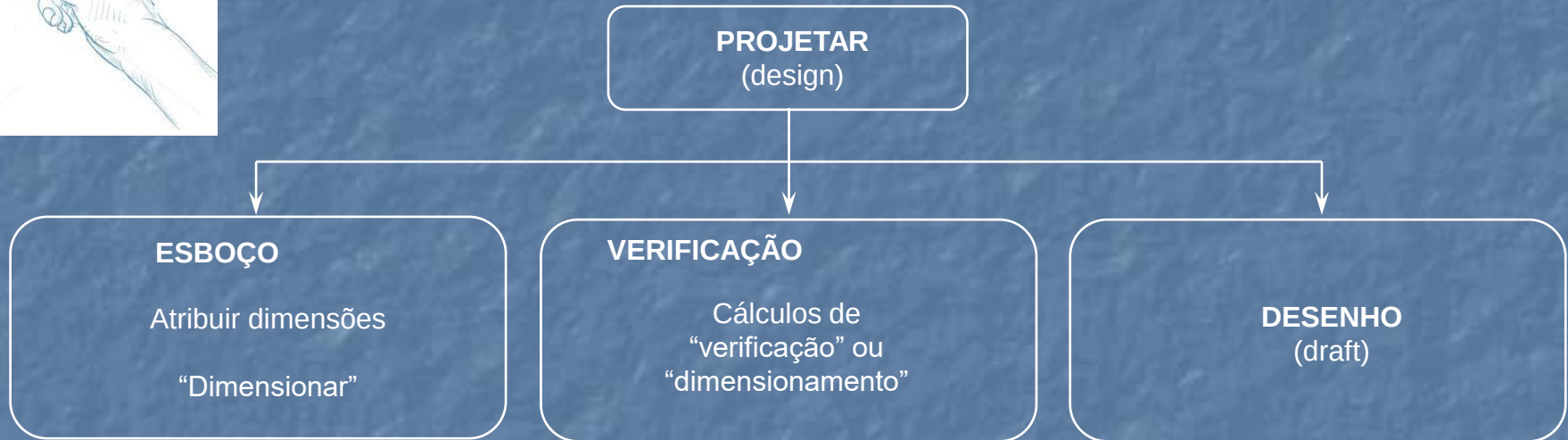
É um ato fundamental para o pensamento criativo. Muitas técnicas de criatividade são citadas na tentativa de unir ideias que se encontram livres.

Ferramentas de geração de ideias:

- Métodos convencionais: procura de literatura, análise de sistemas naturais, análise de sistemas de técnicas existentes, analogias;
- Métodos intuitivos: *brainstorming*, *brainwriting* (Método 6.3.5 – 6 pessoas, 3 ideias, 5 minutos), método de combinação;
- Métodos discursivos: estudo sistemático de processos físicos, busca sistemática com esquemas de classificação auxiliar, uso de catálogos técnicos de projeto.

Algumas requerem pouco tempo e esforço. Assim, os possíveis benefícios de uma solução inovadora geralmente justificam os seus custos. Para muitos projetistas, quando se necessita de uma ferramenta para geração de novas ideias adota-se o processo de *Brainstorming*. Porém, essa técnica pode se mostrar pouco eficiente. Segundo Baxter (1999), a principal característica do *Brainstorming* baseia-se nas ideias de uma pessoa, que inspira outras pessoas e, assim ideias vão fluindo respectivamente. Porém, deve-se cuidar para que o processo não fique polarizado na ideia inicial. Dessa forma, o resultado obtido não será muito diferente daquele que seria conseguido individualmente.

1.7 Projetar, dimensionar, verificar

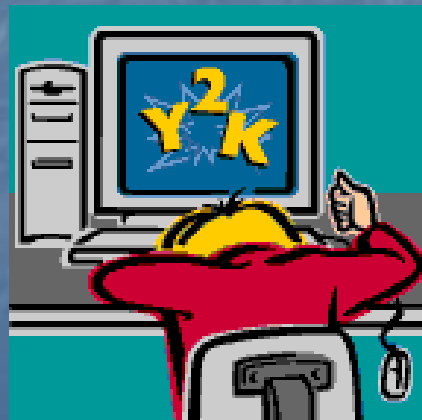


Critérios usuais:

- Tensão admissível
- Flecha (deformação) admissível

• Outros Critérios:

- rigidez dinâmica
- velocidade crítica
- resistência à corrosão
- etc



2. Regras de bem projetar

2.1 Redução de custos

a) Redução de custos na construção.Ex:

- Comprar ou fabricar nós mesmos?
- Padronização e normalização de peças

b) Redução de custos de material.Ex:

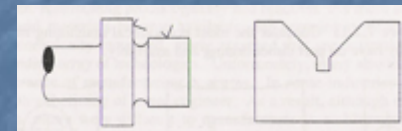
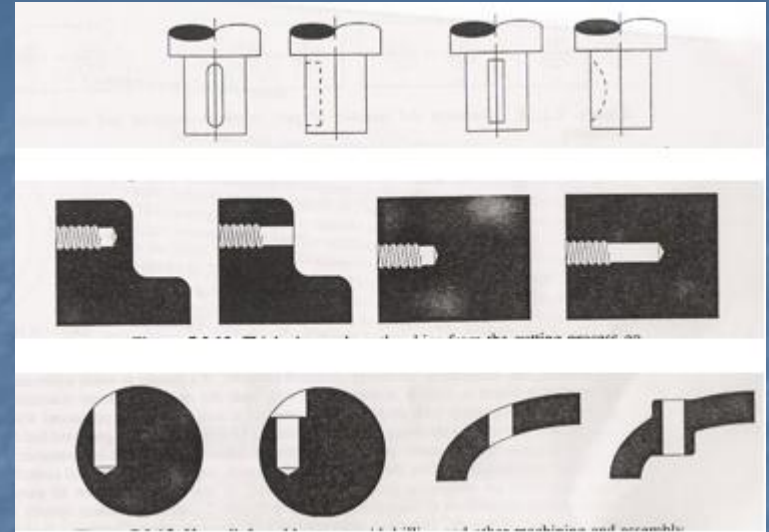
- Formatos adequados
- Forjamento ou fundição
- Redução de sobras, aparas, refugos

c) Redução de custos de fabricação.Ex:

- Processos de fabricação adequados
- Acabamentos e tolerâncias somente em superfícies funcionais

d) Redução de custos para o consumidor.Ex:

- Facilidade de manutenção, montagem e desmontagem
- Baixo custo de embalagem
- Baixo custo de transporte



2.2 Influência das solicitações em serviço

a) Dimensionamento e verificações corretas. Uma peça não deve:

- Romper
- Deformar excessivamente
- Desgastar
- Ser corroída

b) Evitar esforços e sobrecargas desnecessárias.Ex

- Fusíveis
- Pinos de segurança



Trem de pouso de nariz
Fonte: Liebherr (2016)



Rebocador

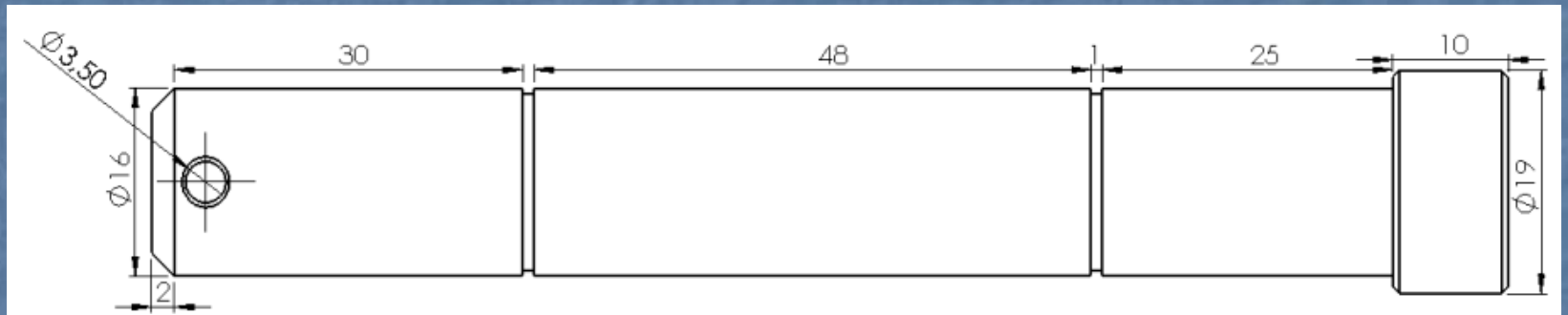
Barra push back



Pino de acoplamento do trem de pouso à barra push back



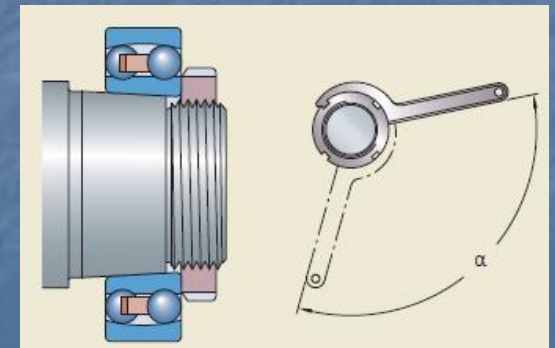
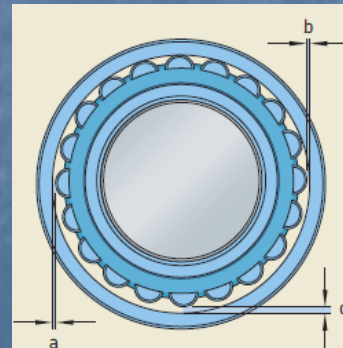
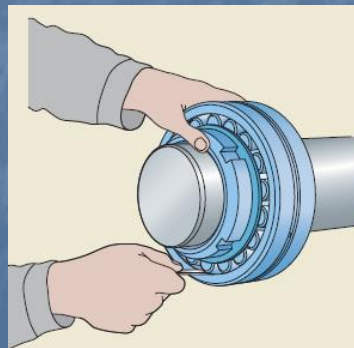
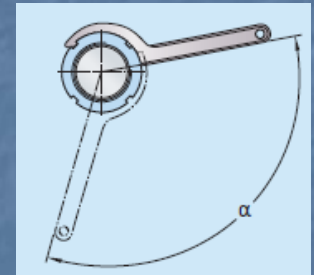
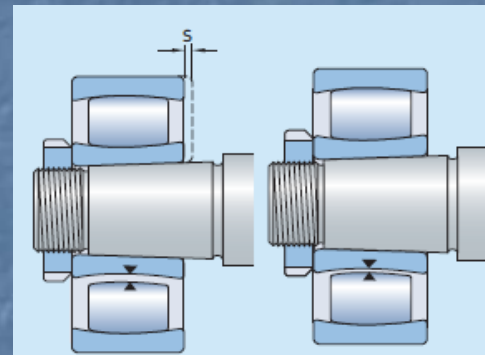
Pino de segurança



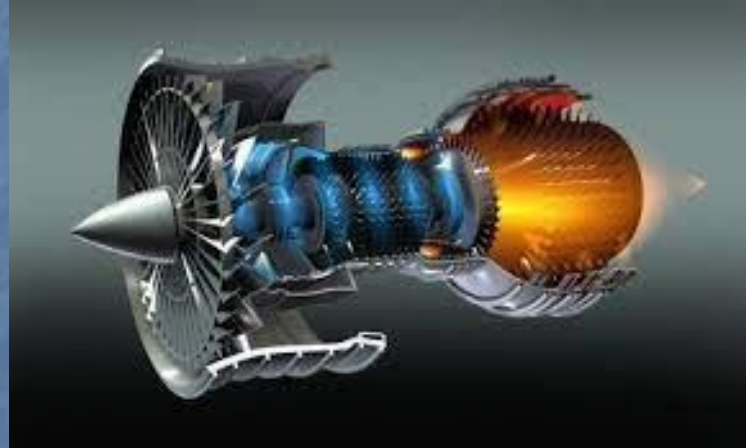
Fusível mecânico em Al DIN 3.3549 para o AIRBUS A320

c) Se existirem choques, forças alternativas, reversão de movimentos.Ex:

- Eliminar folgas
- Usar pré-carga



- d) Se existirem rotações elevadas.Ex:
- Balanceamento
 - Velocidades críticas e ressonâncias



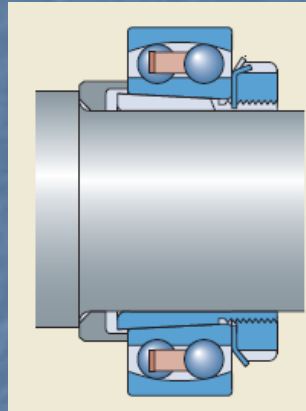
e) Baixo ruído de funcionamento.Ex:

- Mancais de deslizamento
- Materiais e lubrificação adequados
- Amortecimento interno

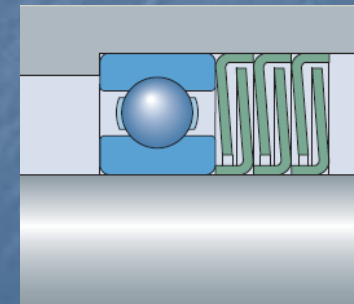
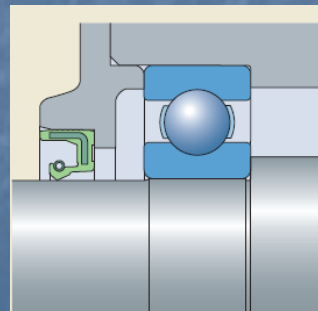


f) Atrito e desgaste.Ex:

- Usar materiais adequados
- Dureza adequada
- Peças postiças / ajustáveis



g) Vedações



2.3 Influência da operação, manutenção e segurança do funcionamento

a) Facilitar a operação. Ex:

- Ergonomia;

b) Prever falta de cuidado: Ex:

- Soluções *foolproof*;

c) Segurança de funcionamento. Ex:

- Freios de segurança;

d) Facilitar manutenção. Ex;

- Lubrificação acessível.

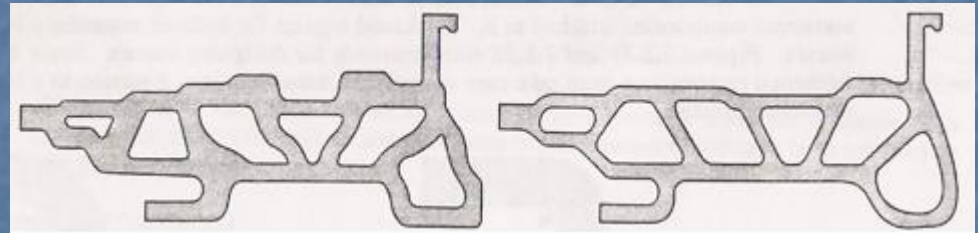
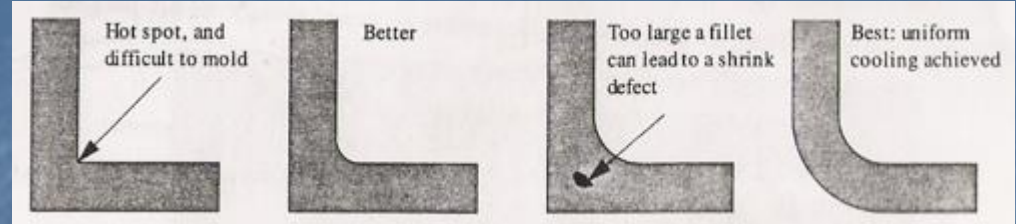


Fonte: Norman 1990

2.4 Influência do material e processo de fabricação

a) Uso de materiais avançados.Ex:

- Plásticos / polímeros
- Cerâmicas
- Ligas de Titânio
- Fibras de vidro / Carbono
- Silício, vidros ópticos, etc.

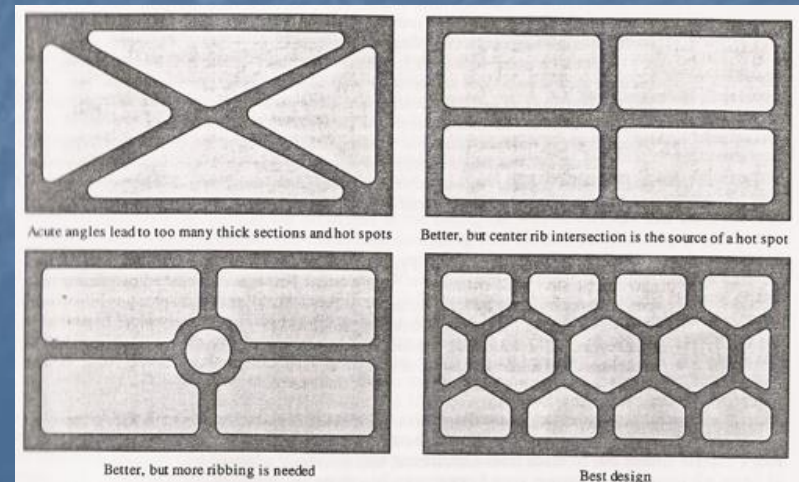


b) Influência do número de peças.Ex:

- Lote pequeno → peças soldadas
- Lote grande → peças fundidas

c) Projetar formas de acordo com material + processo.Ex:

- Peças fundidas
- Peças forjadas
- Peças soldadas
- Peças usinadas
- Peças injetadas
- Peças extrudadas
- Peças coladas
- Peças sinterizadas



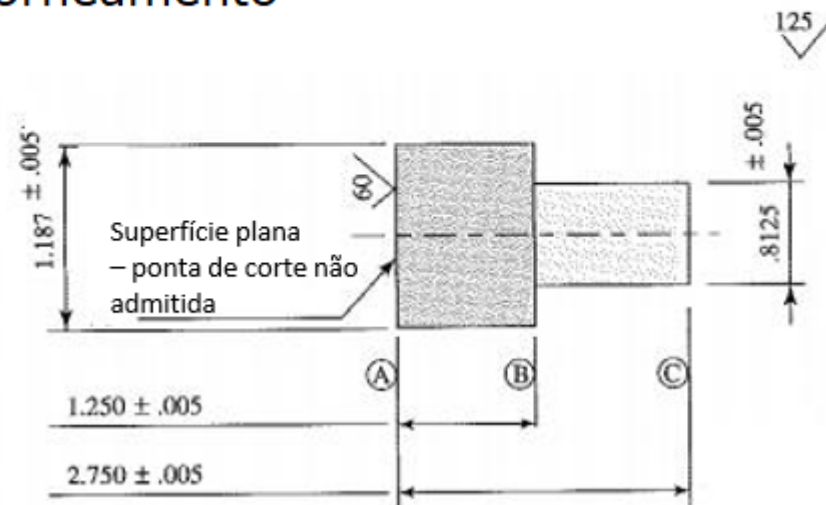
- Exemplo 1

Pivô

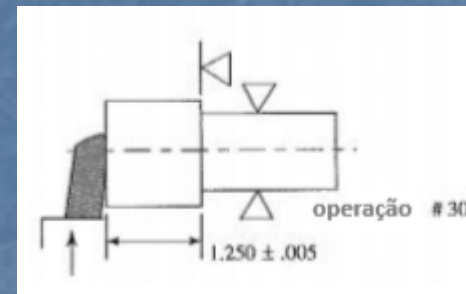
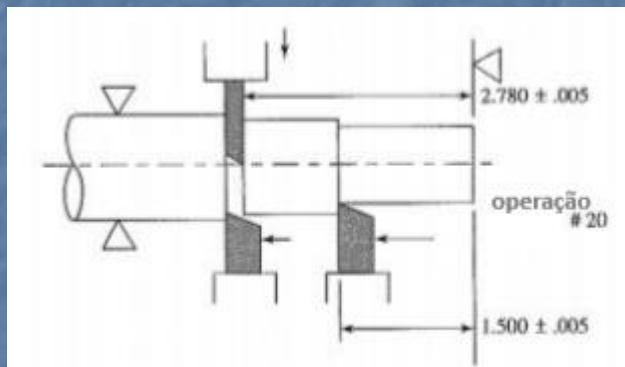
Material: barra laminada

Processamento: torneamento

Produção: baixa



Op. No.	Equipamento	Descrição da operação
20	Torno revólver	Alimentar com barra laminada até "stop" Pinça no diâmetro Tornear os dois diâmetros Cortar no comprimento
30	Torno	Prender na placa pelo diâmetro menor Localizar contra ombro Facear face maior



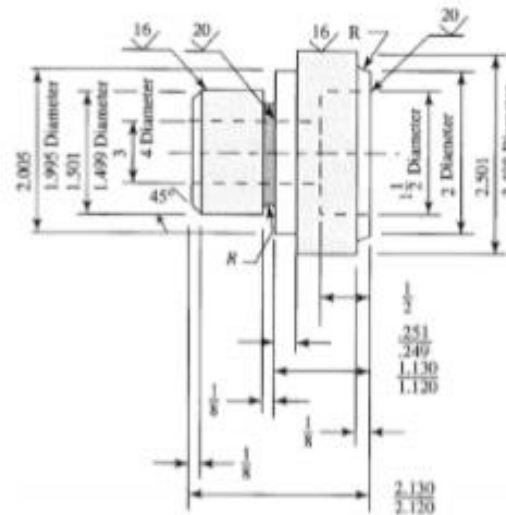
- Exemplo 2

Overrunner clutch hub (cubo da embreagem)

Material: **Aço forjado**

Processamento: torneamento, furação, tratamento térmico (cementação e têmpera, **0,06" mín.**), retificação.

Produção: alta





3. Responsabilidade do produto

De maneira geral o Engenheiro Projetista bem como o fabricante de um produto (Engenheiros de Produção) são responsáveis pelos danos ou ferimentos que estes venham a causar, mesmo que não tenham a noção sobre o defeito.

As melhores práticas de prevenção são:

- engenharia satisfatória: análise;
projeto;
controle de qualidade;
ensaios;
normalização

4. Incertezas

- Composição dos materiais
- Variação das propriedades ao longo do material
- Efeito de processos de fabricação
- Efeito de uniões nas propriedades
- Variação na intensidade e distribuição de cargas
- Aproximação dos modelos usados
- Intensidade de concentração de tensões
- Corrosão, desgaste e outros.

4.1. Análise determinística

Fator de projeto e fator de segurança

$$n_d = \frac{\text{parâmetro de perda de função}}{\text{parâmetro máximo admissível}}$$

$$\text{Carga máxima admissível} = \frac{\text{carga de perda de função}}{n_d}$$

Exemplo 1 – Fator de projeto

Considere que a carga máxima em uma estrutura seja conhecida com uma incerteza de $\pm 20\%$ e que a carga que provoca falha seja conhecida com uma incerteza de $\pm 15\%$. Se a carga causadora da falha for *nominalmente* igual a 9 kN, determine o fator de projeto e a carga máxima admissível que compensará as incertezas absolutas.

Tamanhos preferenciais e séries de Renard

Table A-17

Preferred Sizes and
Renard (R-Series)
Numbers

(When a choice can be
made, use one of these
sizes; however, not all
parts or items are
available in all the sizes
shown in the table.)

Fraction of Inches

$\frac{1}{64}, \frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{3}{32}, \frac{1}{8}, \frac{5}{32}, \frac{3}{16}, \frac{1}{4}, \frac{5}{16}, \frac{3}{8}, \frac{7}{16}, \frac{1}{2}, \frac{9}{16}, \frac{5}{8}, \frac{11}{16}, \frac{3}{4}, \frac{7}{8}, 1, 1\frac{1}{4}, 1\frac{1}{2}, 1\frac{3}{4}, 2, 2\frac{1}{4}, 2\frac{1}{2}, 2\frac{3}{4}, 3, 3\frac{1}{4}, 3\frac{1}{2}, 3\frac{3}{4}, 4, 4\frac{1}{4}, 4\frac{1}{2}, 4\frac{3}{4}, 5, 5\frac{1}{4}, 5\frac{1}{2}, 5\frac{3}{4}, 6, 6\frac{1}{2}, 7, 7\frac{1}{2}, 8, 8\frac{1}{2}, 9, 9\frac{1}{2}, 10, 10\frac{1}{2}, 11, 11\frac{1}{2}, 12, 12\frac{1}{2}, 13, 13\frac{1}{2}, 14, 14\frac{1}{2}, 15, 15\frac{1}{2}, 16, 16\frac{1}{2}, 17, 17\frac{1}{2}, 18, 18\frac{1}{2}, 19, 19\frac{1}{2}, 20$

Decimal Inches

0.010, 0.012, 0.016, 0.020, 0.025, 0.032, 0.040, 0.05, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.16, 0.20, 0.24, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 1.00, 1.20, 1.40, 1.60, 1.80, 2.0, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0, 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 5.0, 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 6.0, 7.0, 7.5, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0, 12.5, 13.0, 13.5, 14.0, 14.5, 15.0, 15.5, 16.0, 16.5, 17.0, 17.5, 18.0, 18.5, 19.0, 19.5, 20

Millimeters

0.05, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.16, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.0, 1.1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 8.0, 9.0, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 35, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300

Renard Numbers*

1st choice, R5: 1, 1.6, 2.5, 4, 6.3, 10

2d choice, R10: 1.25, 2, 3.15, 5, 8

3d choice, R20: 1.12, 1.4, 1.8, 2.24, 2.8, 3.55, 4.5, 5.6, 7.1, 9

4th choice, R40: 1.06, 1.18, 1.32, 1.5, 1.7, 1.9, 2.12, 2.36, 2.65, 3, 3.35, 3.75, 4.25, 4.75, 5.3, 6, 6.7, 7.5, 8.5, 9.5

*May be multiplied or divided by powers of 10.

Exemplo 2 – Fator de projeto

Uma barra de seção circular de área A é submetida a uma força de tração $P = 9 \text{ kN}$. Sabendo que a resistência do material da barra é $S = 168 \text{ MPa}$, qual o menor diâmetro admissível para um fator de projeto $n_d = 3,0$. Usando um diâmetro preferencial, qual o fator de segurança.

4.2. Análise estocástica

Confiabilidade R é a probabilidade de sistemas e componentes não apresentarem falha

$$0 \leq R \leq 1$$

Sendo

O parâmetro de perda de função a resistência do material (S) e

O parâmetro máximo admissível a tensão (σ)

$$\begin{array}{lll} \text{Se} & S = N(\mu_S, \hat{\sigma}_S) & \text{e} \\ & \sigma = N(\mu_\sigma, \hat{\sigma}_\sigma) & \\ & m = S - \sigma & \text{então} \\ & m = N(\mu_m, \hat{\sigma}_m) & \end{array}$$

onde μ representa a média
 $\hat{\sigma}$ representa o desvio padrão

Confiabilidade R é a probabilidade p de $m > 0$

Para encontrar R, cria-se a variável z de m e substitui-se m = 0

$$z = \frac{m - \mu_m}{\hat{\sigma}_m} = \frac{0 - \mu_m}{\hat{\sigma}_m} = -\frac{\mu_S - \mu_\sigma}{(\hat{\sigma}_S^2 + \hat{\sigma}_\sigma^2)^{1/2}}$$

A confiabilidade R associada a z é dada na Tabela A-10 do Shigley

Se $z > 0$ a Tabela fornece R

Se $z \leq 0$ a Tabela fornece 1-R

Substituindo $C_S = \frac{\hat{\sigma}_S}{\mu_S}$

$$C_\sigma = \frac{\hat{\sigma}_\sigma}{\mu_\sigma}$$

E o fator de segurança médio $\bar{n} = \frac{\mu_S}{\mu_\sigma}$ na equação acima

Obtém-se
$$\bar{n} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - (1 - z^2 C_S^2)(1 - z^2 C_\sigma^2)}}{1 - z^2 C_S^2}$$

+ está associado a $R > 0,5$ e – está associado a $R < 0,5$

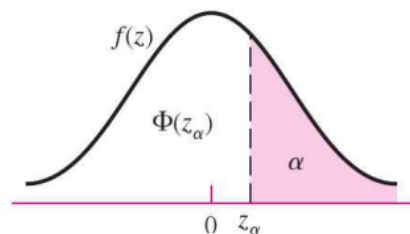
Para maiores detalhes, ver Seção 5-13 e Capítulo 20 do Shigley

Tabela A-10

Função cumulativa de distribuição da distribuição normal (Gaussiana).

$$\Phi(z_\alpha) = \int_{-\infty}^{z_\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\mu}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

$$= \begin{cases} \alpha & z_\alpha \leq 0 \\ 1 - \alpha & z_\alpha > 0 \end{cases}$$



z_α	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4840	0,4801	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641
0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3238	0,3192	0,3156	0,3121
0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
1,0	0,1587	0,1562	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985

1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,068
1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,00990	0,00964	0,00939	0,00914	0,00889	0,00866	0,00842
2,4	0,00820	0,00798	0,00776	0,00755	0,00734	0,00714	0,00695	0,00676	0,00657	0,00639
2,5	0,00621	0,00604	0,00587	0,00570	0,00554	0,00539	0,00523	0,00508	0,00494	0,00480
2,6	0,00466	0,00453	0,00440	0,00427	0,00415	0,00402	0,00391	0,00379	0,00368	0,00357
2,6	0,00466	0,00453	0,00440	0,00427	0,00415	0,00402	0,00391	0,00379	0,00368	0,00357
2,7	0,00347	0,00336	0,00326	0,00317	0,00307	0,00298	0,00289	0,00280	0,00272	0,00264
2,8	0,00256	0,00248	0,00240	0,00233	0,00226	0,00219	0,00212	0,00205	0,00199	0,00193
2,9	0,00187	0,00181	0,00175	0,00169	0,00164	0,00159	0,00154	0,00149	0,00144	0,00139

z_α	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
3	0,00135	0,0 ³ 968	0,0 ³ 687	0,0 ³ 483	0,0 ³ 337	0,0 ³ 233	0,0 ³ 159	0,0 ³ 108	0,0 ⁴ 723	0,0 ⁴ 481
4	0,0 ⁴ 317	0,0 ⁴ 207	0,0 ⁴ 133	0,0 ⁵ 854	0,0 ⁵ 541	0,0 ⁵ 340	0,0 ⁵ 211	0,0 ⁵ 130	0,0 ⁶ 793	0,0 ⁶ 479
5	0,0 ⁶ 287	0,0 ⁶ 170	0,0 ⁷ 996	0,0 ⁷ 579	0,0 ⁷ 333	0,0 ⁷ 190	0,0 ⁷ 107	0,0 ⁸ 599	0,0 ⁸ 332	0,0 ⁸ 182
6	0,0 ⁹ 987	0,0 ⁹ 530	0,0 ⁹ 282	0,0 ⁹ 149	0,0 ¹⁰ 777	0,0 ¹⁰ 402	0,0 ¹⁰ 206	0,0 ¹⁰ 104	0,0 ¹¹ 523	0,0 ¹¹ 260
z_α	-1,282	-1,643	-1,960	-2,326	-2,576	-3,090	-3,291	-3,891	-4,417	
$F(z_\alpha)$	0,10	0,05	0,025	0,010	0,005	0,001	0,0005	0,0001	0,000005	
$R(z_\alpha)$	0,90	0,95	0,975	0,990	0,995	0,999	0,9995	0,9999	0,999995	

5. Bibliografia

BAXTER, M. *Projeto de Produto*. Ed. Edgard Blücher, 2000.

NIEMANN, G. “Elementos de Máquinas”, vols. I, II e III, Editora Edgard Blucher, 1991.

NORTON, R.L. “Projeto de Máquinas”, 2.ed. Bookman, Porto Alegre, 2004.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K-H. *Projeto na Engenharia*, Ed. Edgard Blucher. 2005, 412p.

PUGH, S. *Total design: Integrated method for successful product engineering*. Addison-Wesley, 1995.

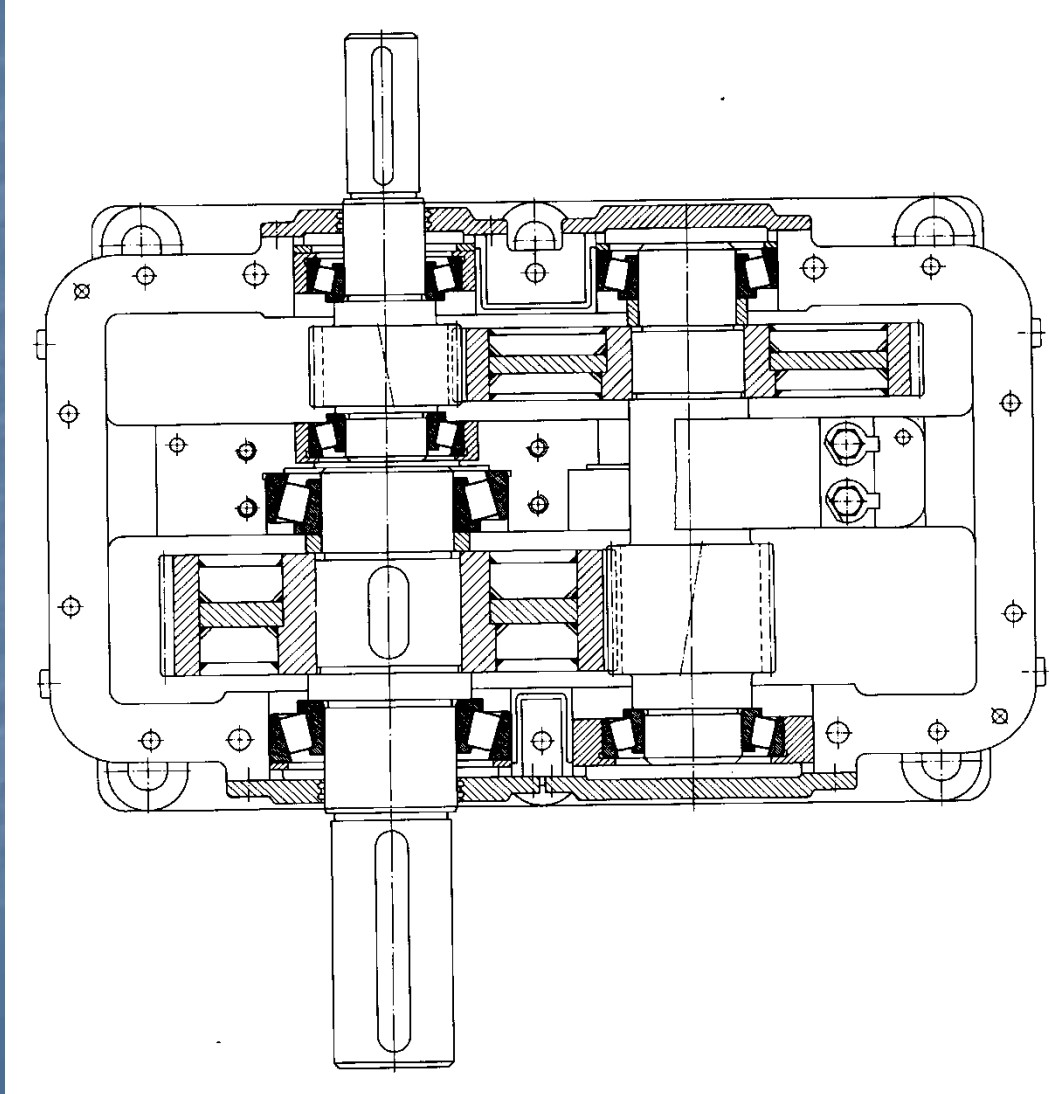
SHIGLEY, J. E. “*Projeto de Engenharia Mecânica*”, 7.ed. Bookman, Porto Alegre, 2005.

SKF - Catálogo de Rolamentos, 1989.

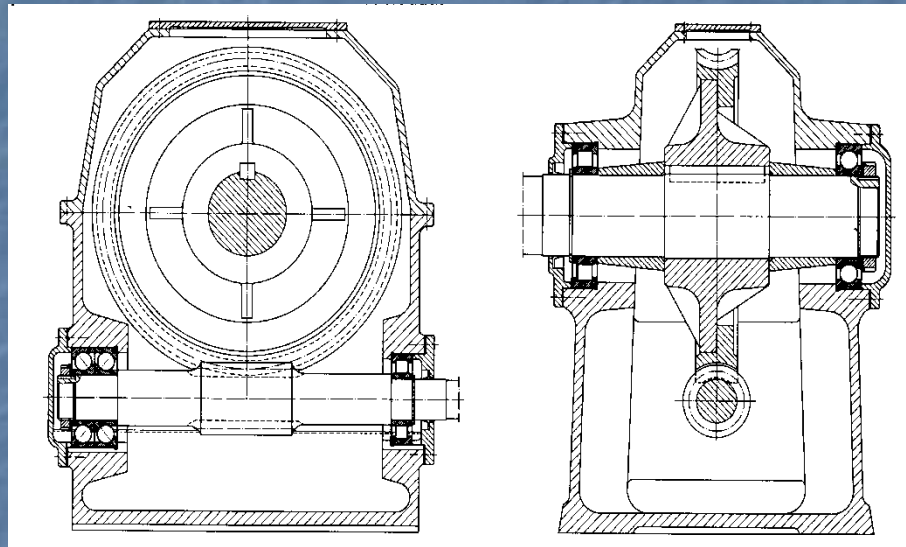
EXERCÍCIOS

1. Identifique as superfícies funcionais

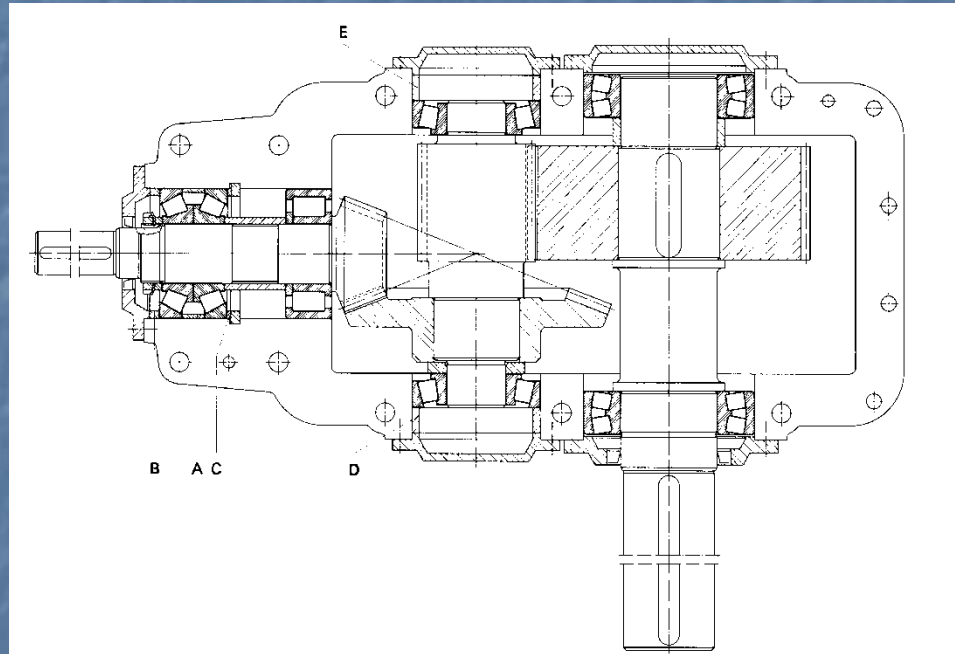
a)



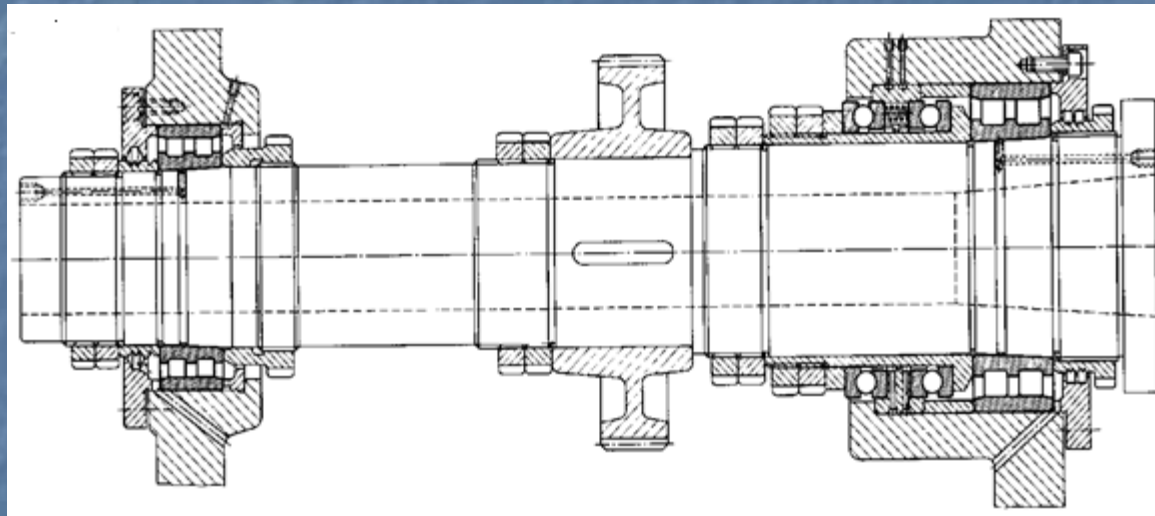
b)



c)



d)



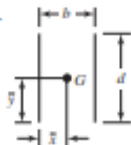
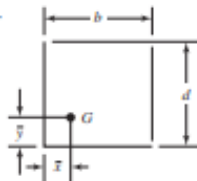
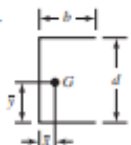
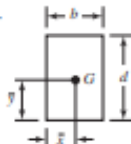
2. Figura de mérito

- a) Propriedades de torsão de filetes de solda

Usando Figura de Mérito (fom) ordene os cordões de solda da tabela ao lado do mais ao menos eficiente.



Torsional Properties of Fillet Welds*

Weld	Throat Area	Location of G	Unit Second Polar Moment of Area
1. 	$A = 0.707 hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = d^3/12$
2. 	$A = 1.414 hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$
3. 	$A = 0.707h(b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b + d)}$ $\bar{y} = \frac{d^2}{2(b + d)}$	$J_u = \frac{(b + d)^4 - 6b^2d^2}{12(b + d)}$
4. 	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{8b^3 + 6bd^2 + d^3}{12} - \frac{b^4}{2b + d}$
5. 	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{(b + d)^3}{6}$
6. 	$A = 1.414 \pi hr$		$J_u = 2\pi r^3$

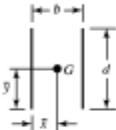
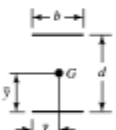
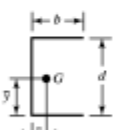
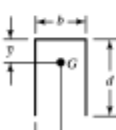
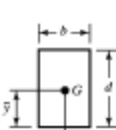
*G is centroid of weld group; h is weld size; plane of torque couple is in the plane of the paper; all welds are of unit width.

b) Propriedades de flexão de filetes de solda

Usando Figura de Mérito (fom) ordene os cordões de solda da tabela ao lado do mais ao menos eficiente.

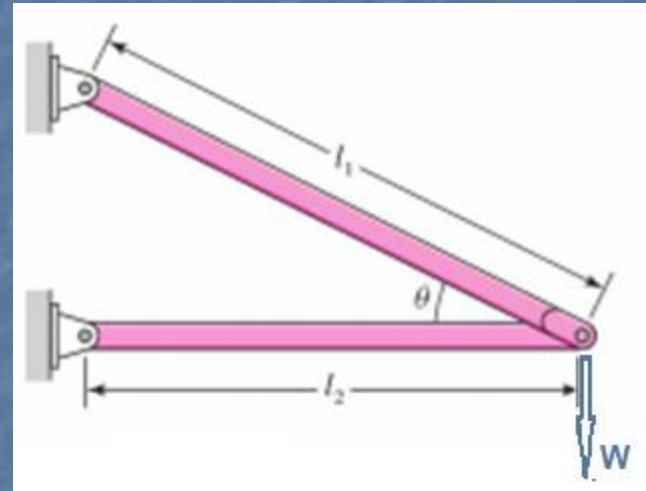
Tabela 9-2

Propriedades de flexão de soldas de filete.*

Solda	Área de garganta	Localização de G	Segundo momento unitário de área
	$A = 0,707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{12}$
	$A = 1,414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{6}$
	$A = 1,414hb$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{bd^2}{2}$
	$A = 0,707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{12}(6b + d)$
	$A = 0,707h(b + 2d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$	$I_u = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$
	$A = 1,414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{6}(3b + d)$
	$A = 1,414\pi hr$		$I_u = \pi r^3$

* I_u , segundo momento unitário de área, é tomado ao redor de um eixo horizontal passando por G, o centroide do grupo de solda; h é o tamanho de solda; o plano do bônio de flexão é normal ao plano do papel e paralelo ao eixo y ; todas as soldas são do mesmo tamanho.

- c) Usando Figura de Mérito (**fom**, do inglês, *figure of merit*) determine o ângulo θ que dá maior eficiência ao suporte representado lado.



3. Escolha de materiais e uso das tabelas do Shigley

a) Determine a RESISTÊNCIA ESPECÍFICA (razão entre a resistência ao escoamento e a densidade em peso) para o aço laminado a quente UNS G10350, o alumínio 2024-T4, a liga de titânio Ti-6Al-4V e o ferro fundido cinzento ASTM no. 30

b) Determine a RIGIDEZ ESPECÍFICA (razão entre o módulo de elasticidade e a densidade em peso) para o aço laminado a quente UNS G10350, o alumínio 2024-T4, a liga de titânio Ti-6Al-4V e o ferro fundido cinzento ASTM no. 30

4. Determinação do fator de segurança – análise estocástica

Uma barra de seção circular de área A é submetida a uma força de tração $P = N(9, 1)$ kN. Sabendo que a resistência do material da barra é $S = N(158, 15)$ MPa, qual o menor diâmetro admissível e o fator de segurança para uma confiabilidade de 98%.

Tabela A-5

Constantes físicas de materiais.

Material	Módulo de elasticidade E		Módulo de rigidez G		Razão de Poisson ν	Peso unitário w		
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lbf/in ³	lbf/ft ³	kN/m ³
Alumínio (todas as ligas)	10,4	71,7	3,9	26,9	0,333	0,098	169	26,6
Berílio – cobre	18,0	124,0	7,0	48,3	0,285	0,297	513	80,6
Bronze	15,4	106,0	5,82	40,1	0,324	0,309	534	83,8
Aço carbono	30,0	207,0	11,5	79,3	0,292	0,282	487	76,5
Ferro fundido (cinza)	14,5	100,0	6,0	41,4	0,211	0,260	450	70,6
Cobre	17,2	119,0	6,49	44,7	0,326	0,322	556	87,3
Madeira de pinheiro (pseudotsuga)	1,6	11,0	0,6	4,1	0,33	0,016	28	4,3
Vidro	6,7	46,2	2,7	18,6	0,245	0,094	162	25,4
Inconel	31,0	214,0	11,0	75,8	0,290	0,307	530	83,3
Chumbo	5,3	36,5	1,9	13,1	0,425	0,411	710	111,5
Magnésio	6,5	44,8	2,4	16,5	0,350	0,065	112	17,6
Molibdênio	48,0	331,0	17,0	117,0	0,307	0,368	636	100,0
Metal de Monel	26,0	179,0	9,5	65,5	0,320	0,319	551	86,6
Níquel – prata	18,5	127,0	7,0	48,3	0,322	0,316	546	85,8
Aço níquel	30,0	207,0	11,5	79,3	0,291	0,280	484	76,0
Bronze – fósforo	16,1	111,0	6,0	41,4	0,349	0,295	510	80,1
Aço inoxidável (18-8)	27,6	190,0	10,6	73,1	0,305	0,280	484	76,0
Ligas de titânio	16,5	114,0	6,2	42,4	0,340	0,160	276	43,4

Tabela A-18

Resistências determinísticas da ASTM mínimas de tração e de escoamento para aços laminados a quente (HR) e estirados a frio (CD). [As resistências listadas são valores mínimos estimados da ASTM no intervalo de medida de 18 a 32 mm ($\frac{3}{4}$ a $1\frac{1}{4}$ in). Estas resistências são apropriadas para uso com o fator de projeto (ou desenho) definido na Seção 1-10, provido que os materiais conformem aos requisitos da ASTM A6 ou A568 ou são requeridos em especificações de compra. Lembre que um sistema de numeração não é uma especificação.] Fonte: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS nº	Nº SAE e/ou AISI	Processamento	Resistência à tração MPa (Kpsi)	Resistência ao escoamento MPa (Kpsi)	Alongamento em 2 in, %	Redução em área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27,5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37,5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39,5)	18	40	143

Tabela A-20

Resultados de ensaios de tração de alguns metais.*

Fonte: J. Datsko, "Solid Materials", cap. 32 em Joseph E. Shigley and Charles R. Michk McGraw-Hill, Nova York, 2004, p. 32.49–32.52

Número	Material	Condição	Escoamento S_y MPa (kpsi)
1018	Aço	Recozido	220 (32,0)
1144	Aço	Recozido	358 (52,0)
1212	Aço	Laminado a quente	193 (28,0)
1045	Aço	Temperado e revenido a 600°F	1520 (220)
4142	Aço	Temperado e revenido a 600°F	1720 (250)
303	Aço inoxidável	Recozido	241 (35,0)
304	Aço inoxidável	Recozido	276 (40,0)
2011	Liga de alumínio	T6	169 (24,5)
2024	Liga de alumínio	T4	296 (43,0)
7075	Liga de alumínio	T6	542 (78,6)

*Valores de um ou dois tratamentos térmicos e que se acredita serem obteníveis usando especificações apropriadas de comp

† Valor derivado.

Tabela A-22

(c) Propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio.

Liga de titânio	Condição	Escoamento, S_y (0,2% de desvio de deformação) MPa (kpsi)	Resistência à tração, S_{UT} MPa (kpsi)	Alongamento em 2 in, %	Dureza (Brinell ou Rockwell)
Ti-35A [†]	Recozido	210 (30)	275 (40)	30	135 HB
Ti-50A [†]	Recozido	310 (45)	380 (55)	25	215 HB
Ti-0,2 Pd	Recozido	280 (40)	340 (50)	28	200 HB
Ti-5 Al-2,5 Sn	Recozido	760 (110)	790 (115)	16	36 HRC
Ti-8 Al-1 Mo-1 V	Recozido	900 (130)	965 (140)	15	39 HRC
Ti-6 Al-6 V-2 Sn	Recozido	970 (140)	1030 (150)	14	38 HRC
Ti-6Al-4V	Recozido	830 (120)	900 (130)	14	36 HRC
Ti-13 V-11 Cr-3 Al	Solução + envelhecimento	1207 (175)	1276 (185)	8	40 HRC

[†] Titânio alfa comercialmente puro.