

APOSTILA
do Prof. Eduardo

Projeto de Máquinas

Avaliação de aspectos técnicos e econômicos

Prof. Eduardo Furlan
2023



Aspectos técnicos e econômicos

- Carro
 - Aço
 - Resistente
 - Segurança
 - Barato (comparado com F1, por exemplo)
- Fórmula 1
 - Fibra de carbono
 - 4x mais leve
 - 2x mais resistente
 - 5-20x mais caro

- Sucesso do projeto (peça ou máquina)
 - Material certo
 - Segurança
 - Confiabilidade
 - Custo
- Projeto para situações extremas de utilização
- Fator de segurança (“N”)
 - Imprevistos

- Como calcular o valor do fator de segurança?
- Como recalcular o valor?
- Quais os critérios para definição dos materiais?
- É possível estimar os custos?
- Quais são os processos?

- Elevador
 - Como ter certeza de que, mesmo com os trancos que sofre nas paradas e partidas, ele não cairá?
 - Somente os cálculos de resistência, bastam?
 - Se calcular a maior carga que ele sustentará, e aplicar nesta carga total a maior aceleração que o motor poderá produzir
- Existem fatores imprevisíveis?

- Fator de segurança (“N”)
 - Relação de duas grandezas semelhantes
 - Tensão admissível / tensão máxima
 - Adimensional
 - Existem casos onde $N = 1$ porém não é comum
 - Ex.: Mísseis
- Usa no projeto a nova carga calculada usando o N
- Cada área tem estudos e FS propostos

Materiais dúcteis (deformam sem romper)

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
	Dados insuficientemente representativos de testes do material estão disponíveis	5+
Condições ambientais nos 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
	Ambiente extremamente desafiador	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
	Os modelos são aproximações grosseiras	5+

Fator de segurança (N)

$$N_{Dúctil} \cong MÁX(F1, F2, F3)$$

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

- Um bom início é comparar as condições de trabalho em que a peça vai trabalhar
 - Nas quais foram obtidos os dados do material considerado
- Condições mais severas → N maior

Cabo de aço

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

- $N \rightarrow$ “cobre” as incertezas do projeto
- Vidas em risco $\rightarrow N$ maior
- Prejuízo por máquina parada $\rightarrow N$ maior
- Aeronaves: de 1,2 a 1,5 , pois precisam ser leves

- Cabo de aço
 - $\sigma > N \rightarrow \sigma > \sigma_{\text{lim}}$
- Em mísseis $\rightarrow N = 1$
- NBR 14712 estabelece as tensões admissíveis para diversos materiais para uso em elevadores de carga

Cálculo de custos do projeto

- Fixos
 - Não dependem da quantidade de peças fabricadas
 - Aluguel
 - Pessoal
 - Água, E.E., e outros não usados na produção
 - Compra de equipamentos
 - Desenvolvimento de projetos

(continua)

- Variáveis
 - Variam com a quantidade de peças fabricadas
 - Matéria-prima
 - Água, E.E., e outros que são usados na produção
- Fluxo de caixa
 - O que o negócio recebe (entra) e o que paga (sai)
- Ponto de equilíbrio
 - Entrada = saída → sem lucro ou prejuízo

- Se vender menos unidades do que o determinado pelo ponto de equilíbrio → prejuízo
- Cálculo da margem de contribuição para os custos fixos
 - Rateio
 - Depende de análise de tudo que é feito pela empresa
- ROI (Return On Investment)

$$ROI = \frac{\overset{\text{Vendas}}{\text{Ganho}} - \overset{\text{Gastos}}{\text{Investimento}}}{\text{Investimento}}$$

calculado em um determinado período

- Custo de um produto (detalhar)
 - Definir as macrotarefas
 - Subdividir em tarefas
 - Pessoas
 - Horas trabalhadas
 - Materiais
 - Processos
 - etc.

Exemplo

- Gastos variáveis

- Componentes

- ganchos
 - correntes
 - estrutura
 - engrenagens
 - parafusos
 - catraca
 - diversos

- Processos de fabricação

- fundição
 - usinagem
 - estampagem
 - forjamento

- caldeamento
- Profissionais envolvidos
 - engenheiro mecânico (para o projeto)
 - técnico em fundição
 - técnico em usinagens
 - técnico em estampagem
 - técnico em forjamento



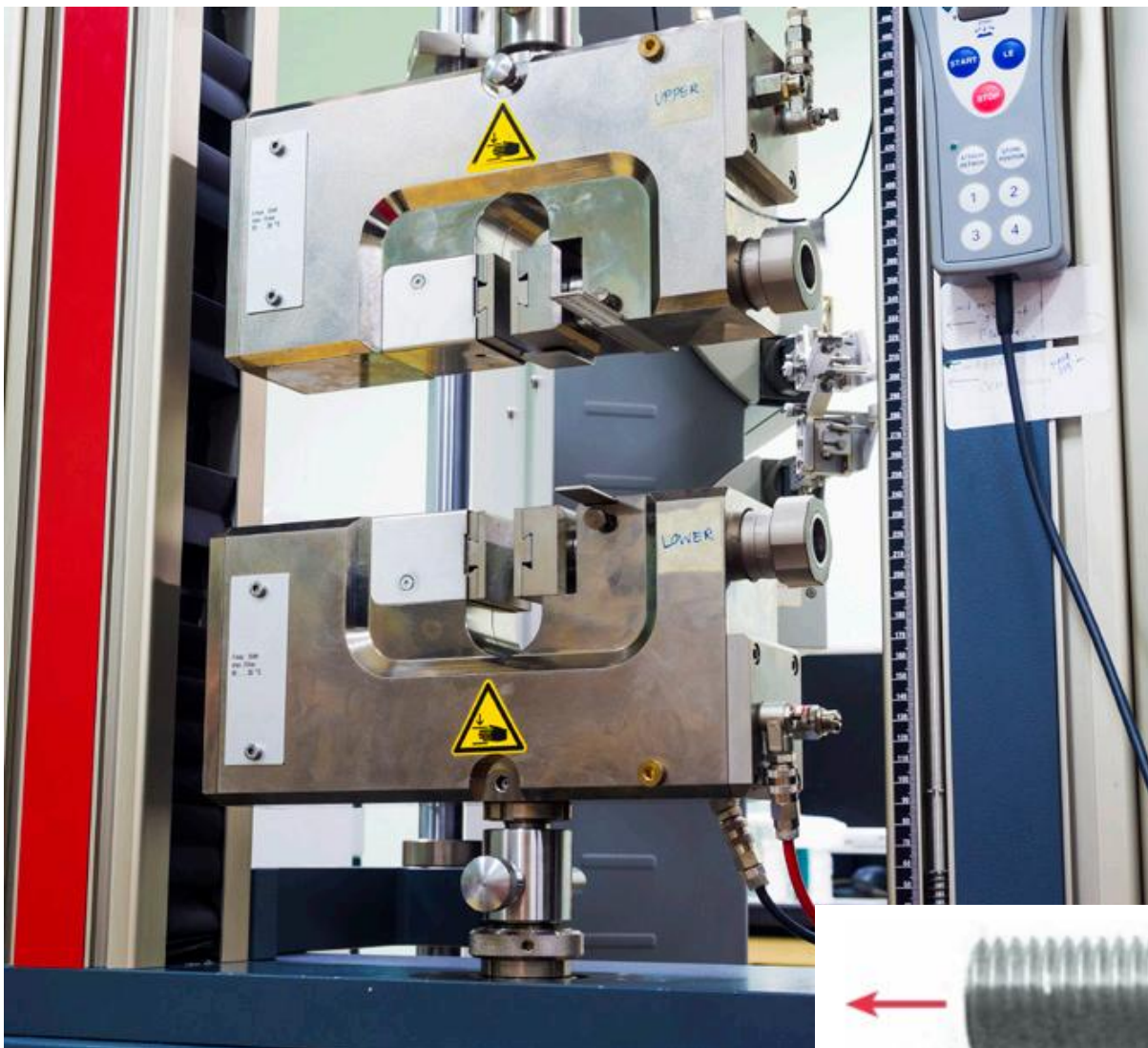
- Avaliados de acordo com os produtos
 - Homem-hora
 - Custo da matéria-prima
 - Custo dos processos
- Custos de implantação
- Eventual valor residual
- etc.

Escolha de materiais e processos

- Principais critérios para materiais
 - Custo
 - Resistência
 - Ductilidade
 - flexível, elástico, maleável, pode reduzir a fios sem se quebrar
 - Dureza
 - Tenacidade
 - absorve a energia plástica e elástica até alcançar a ruptura
 - Resistência à corrosão
 - Densidade
 - Processos disponíveis
 - Aparência

- 1º passo
 - Calcular os esforços atuantes sobre a peça/máquina
 - Seus tipos (torção, compressão, etc.)
- 2º passo
 - Obter as propriedades dos materiais candidatos
 - Resistência à tração, dureza e algumas outras propriedades podem ser obtidas em
 - Manuais
 - Catálogos de fabricantes
 - Internet

- Certeza das características dos materiais existentes
 - Efetuar testes adequados
 - Ex.: tração
 - Corpo de prova padronizado
 - Limite de resistência
 - Módulo de elasticidade
 - Coeficiente de Poisson
 - Deformação transversal
- Quanto melhor o conhecimento dos materiais e processos
 - Melhor a possibilidade de reduzir o N



Máquina
para
ensaio de
tração

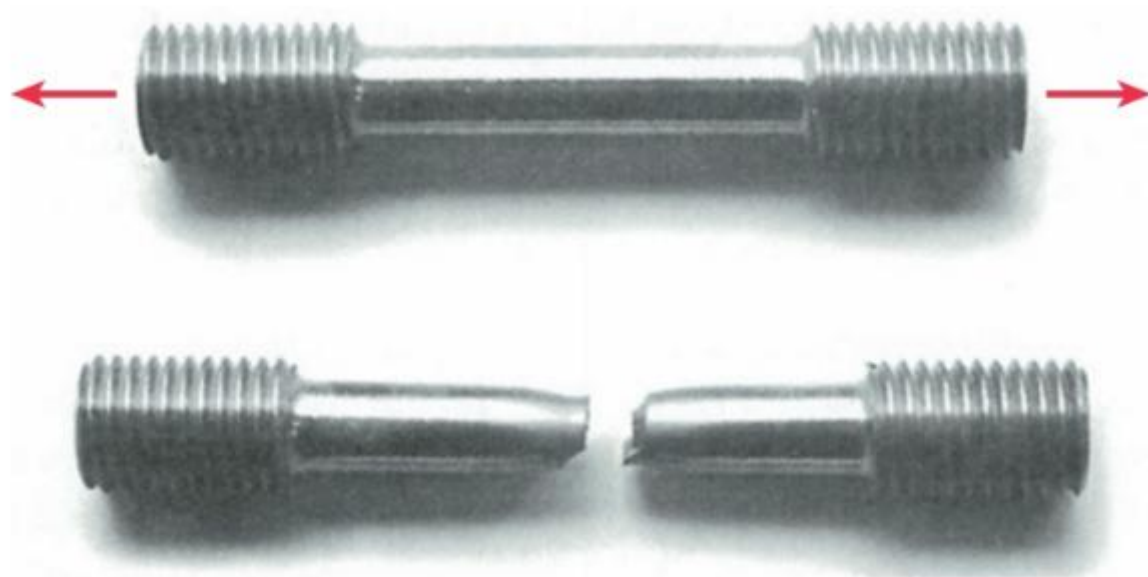
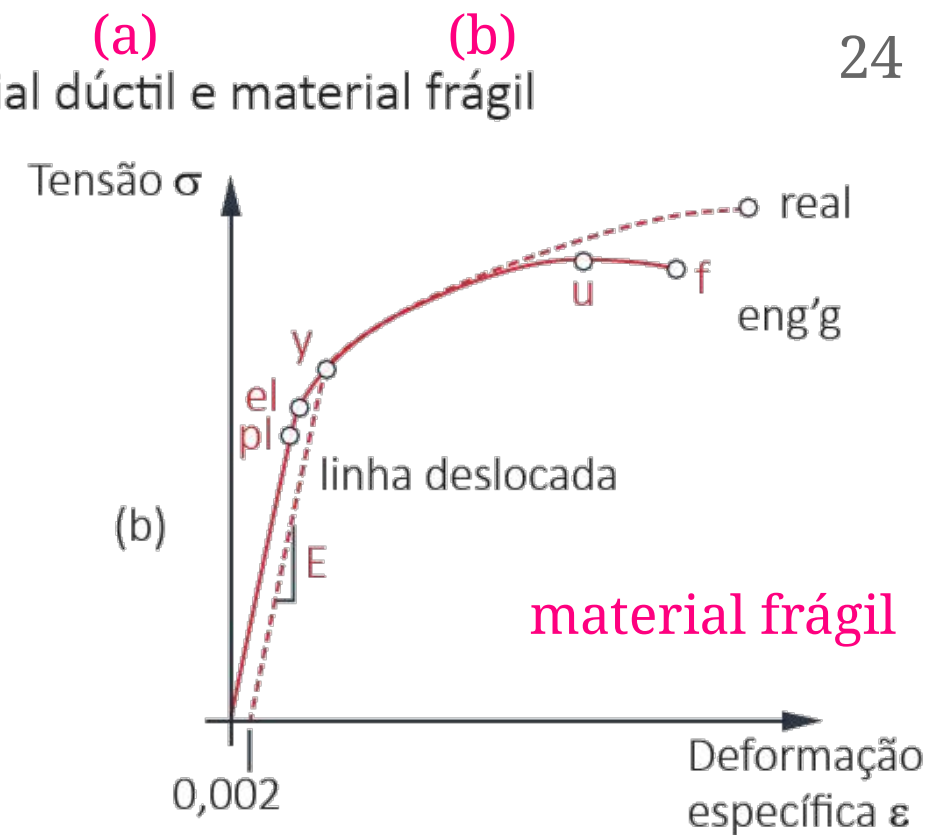
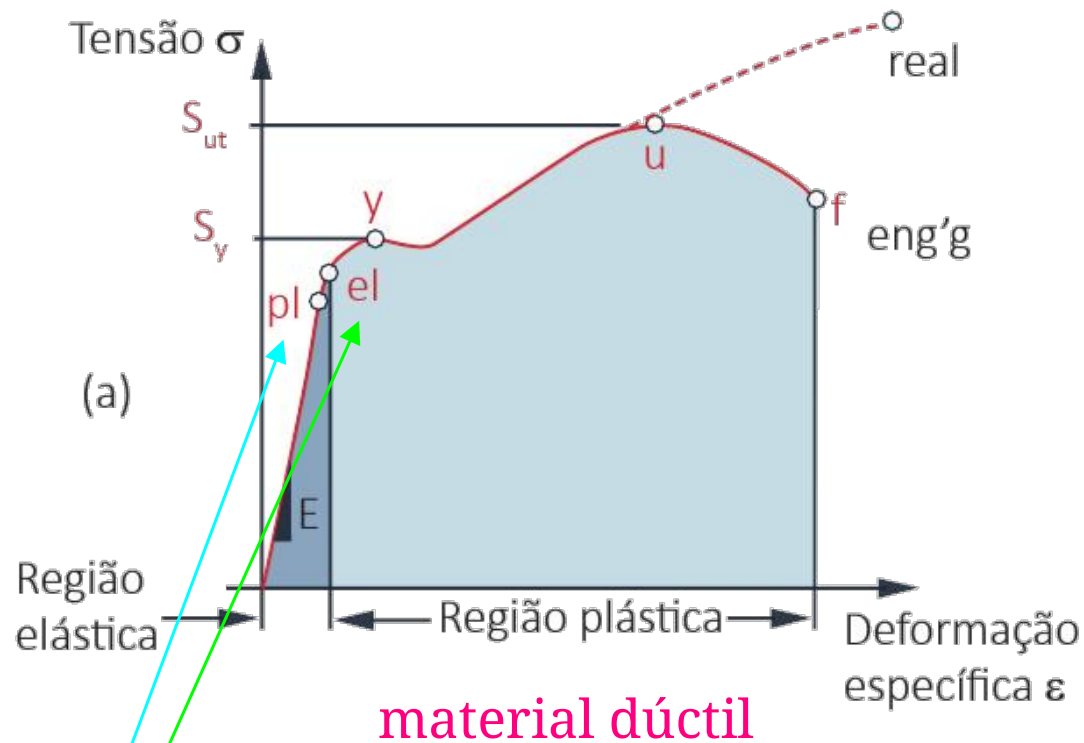


Figura 1.7 | Gráfico tensão x deformação para material dúctil e material frágil



- pl : limite de proporcionalidade abaixo do qual a tensão é proporcional à deformação
- el : limite elástico, ponto onde adquire forma permanente ou deformação plástica
- y : ponto de escoamento
- S_y : resistência ao escoamento | tensão limite de escoamento
- S_{ut} : resistência à tração | tensão limite resistência | tensão limite de ruptura na tração
- f : ponto de ruptura
- E : módulo de elasticidade (ou módulo de Young)
- $eng'g$: *Engineering Stress-Strain Curve* (curva estresse-deformação)
- $real$: caso as mudanças da área durante o teste fossem levadas em consideração

- Na região linear, Lei de Hooke

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

tensão
aplicada

módulo de
elasticidad
e

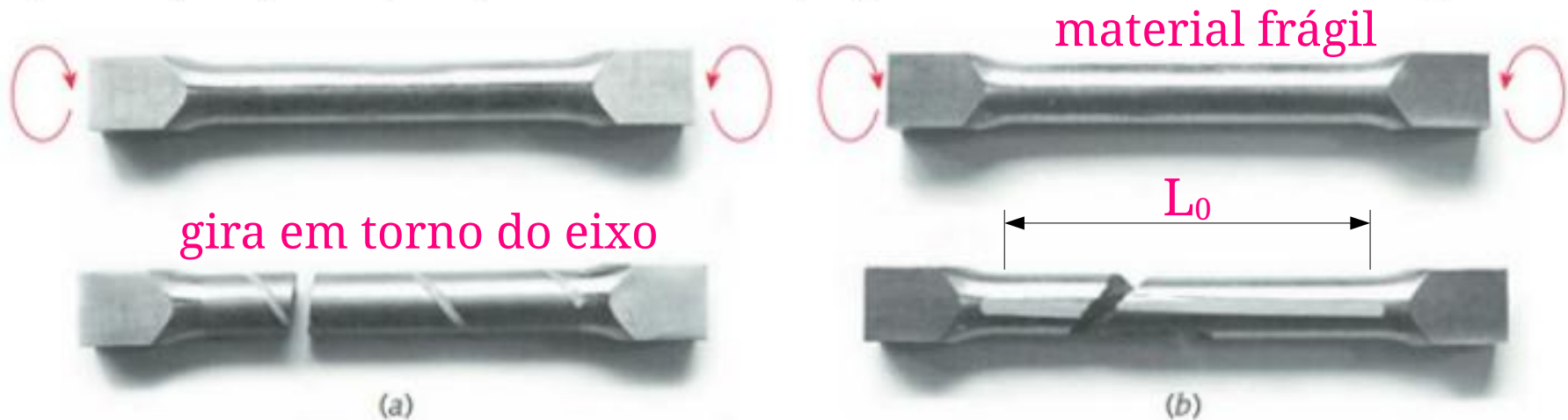
deformação
relativa do corpo

- Ensaio de compressão
 - Corpo de prova cilíndrico
 - Menos frequente que o de tração
- Ensaio de flexão
 - Obter curva tensão x deformação

Ensaio de torção

obter tensão de
cisalhamento

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



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

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

Tau

Teta

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

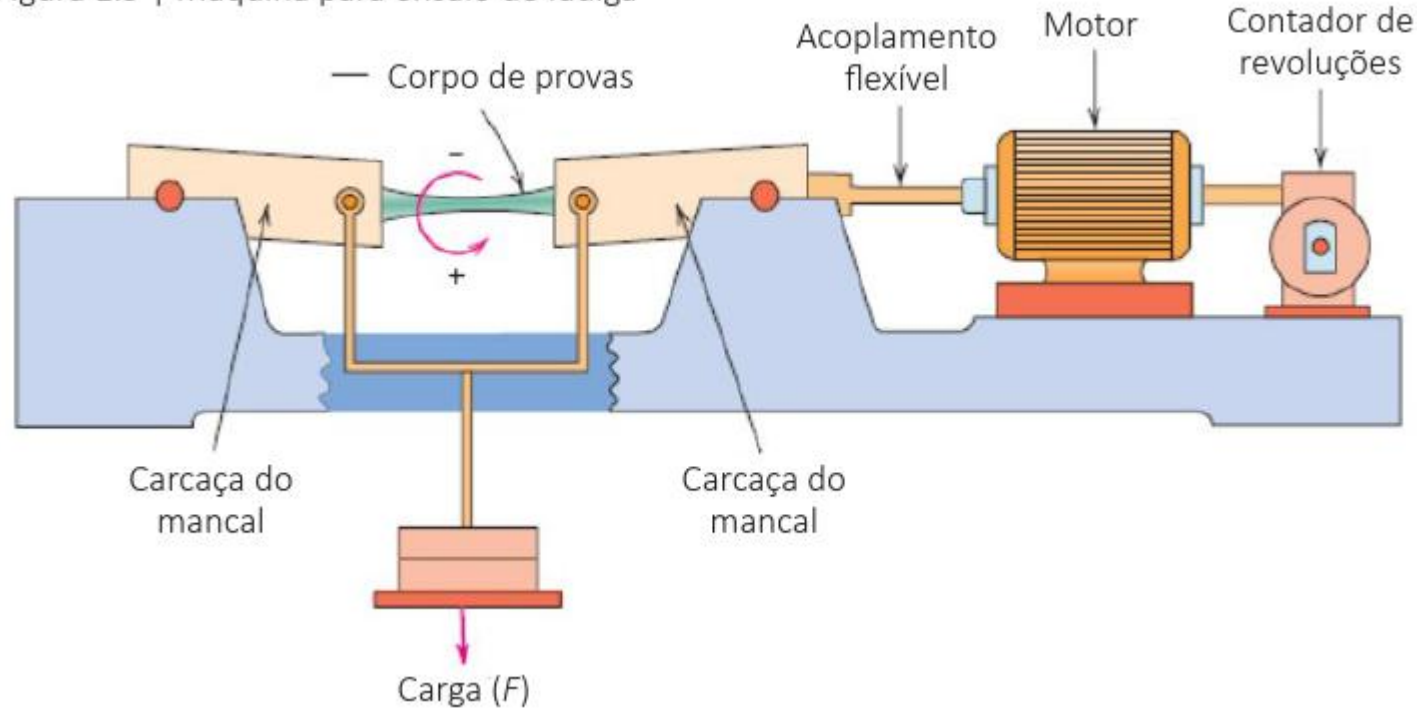
Ni

τ : tensão de cisalhamento
 G : módulo de elasticidade transversal
 r : raio do corpo de prova
 θ : ângulo de rotação do corpo
 L_0 : comprimento de trabalho do corpo

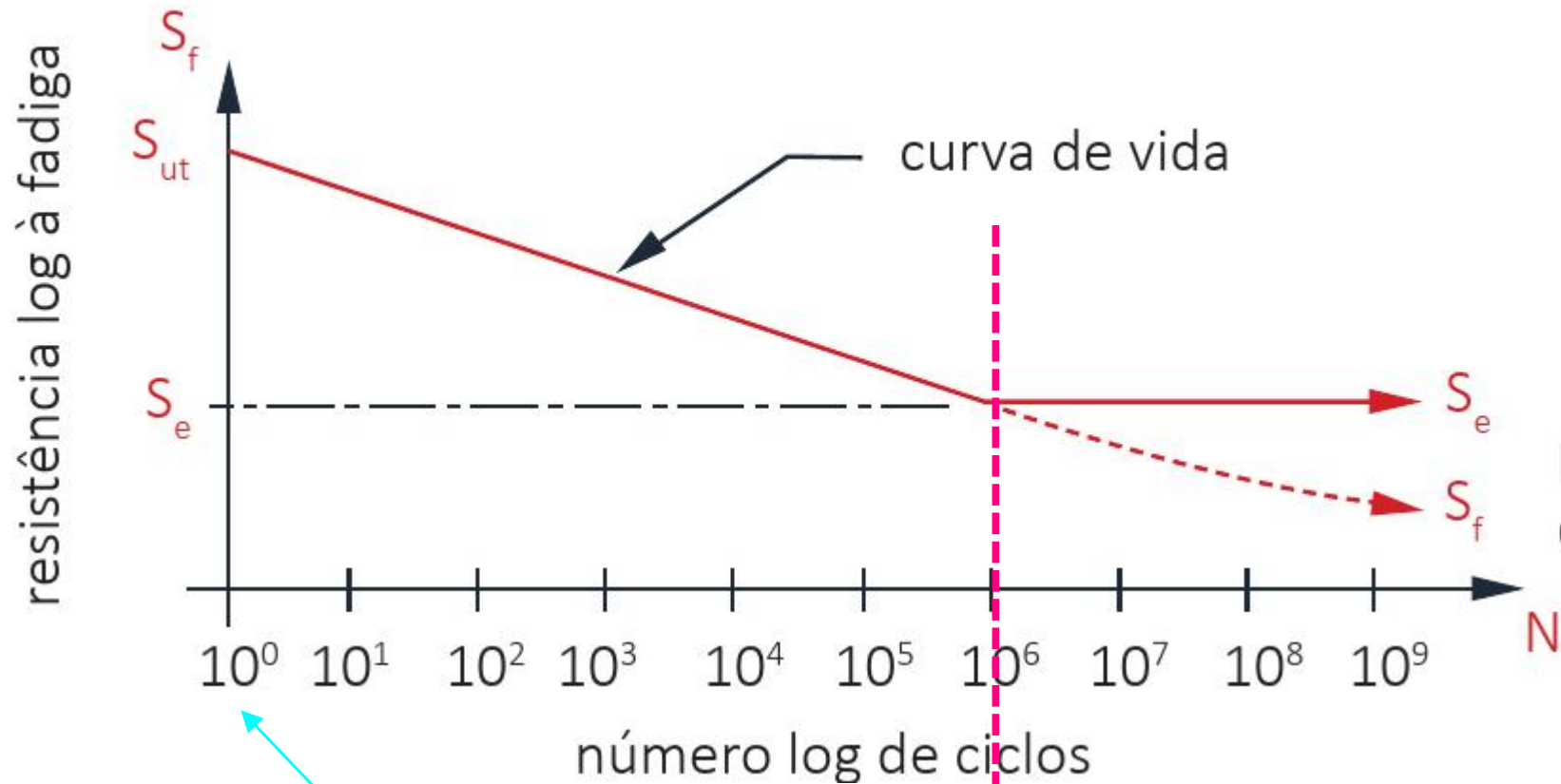
E : módulo de elasticidade
 ν : coeficiente de Poisson

Resistência à fadiga

Figura 1.9 | Máquina para ensaio de fadiga



- Ocorre com tensões abaixo da tensão limite de escoamento
- Solicitações variáveis no tempo
- Corpo de prova semelhante ao que é usado em ensaios de tração
- Aplicada uma carga de flexão no centro e o corpo é posto a girar
- Tração e compressão alternando durante o giro
- Registra-se a quantidade de ciclos



- S_e : limite de resistência à fadiga para alguns materiais ferrosos e ligas de titânio
- S_f : resistência à fadiga
- S_{ut} : resistência estática (S_f de um ciclo)
- 10^6 ciclos : 40-50% da S_{ut} para os materiais

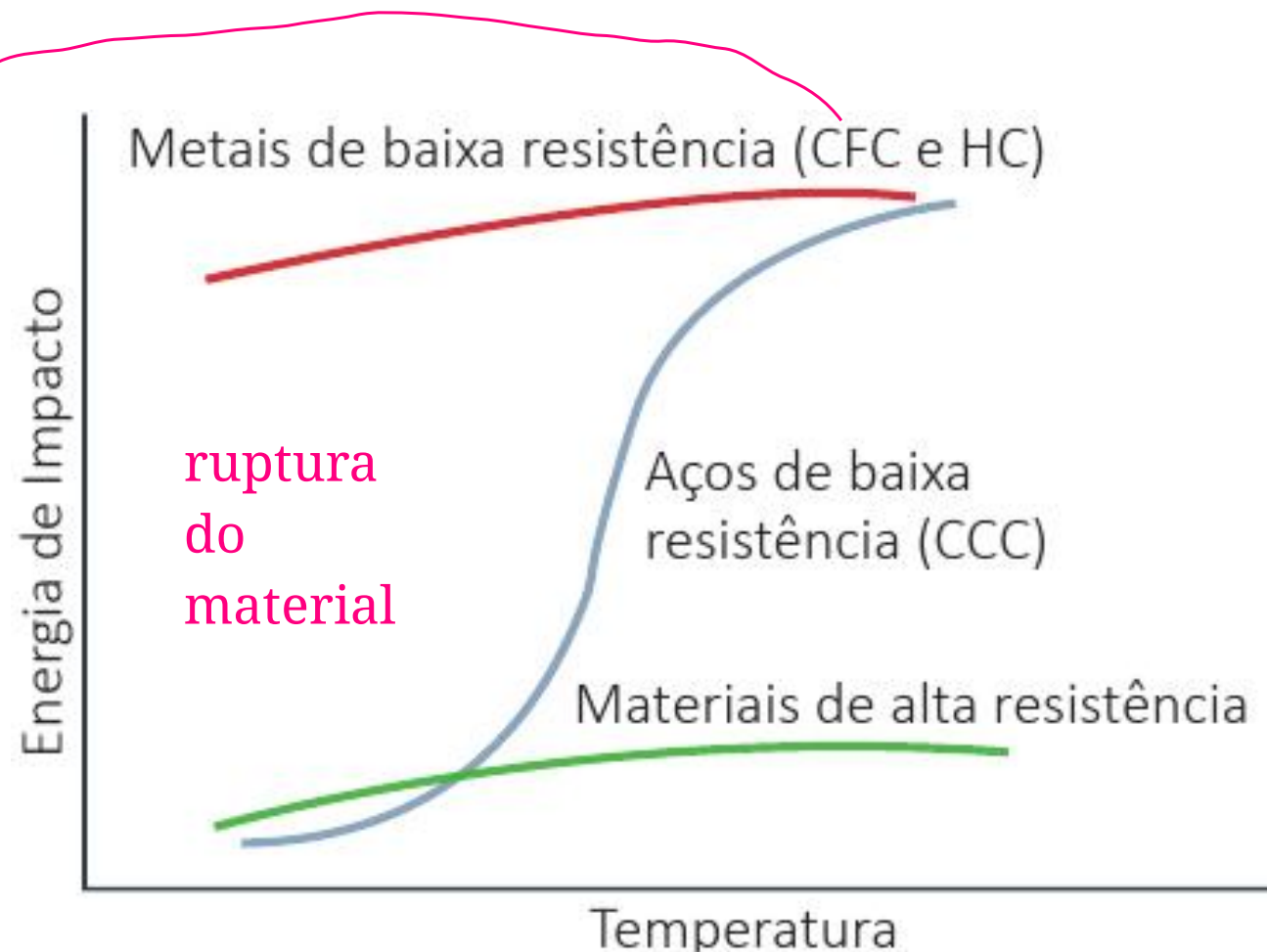
Resistência ao impacto

- Tenacidade: absorver energia sem se romper
- Materiais dúcteis: em determinadas circunstâncias podem se comportar como frágeis

- Temperatura é o fator que mais afeta

Estruturas cristalinas

- CCC: cúbico de corpo centrado
- CFC: cúbico de faces centradas
- HC: hexagonal



Outros materiais

- Além de metal, podemos usar outros materiais no projeto
 - Madeira
 - Cerâmica
 - Compósito polimérico
 - Outros
- Metal
 - Ferroso
 - Não ferroso
- Outros critérios
 - Facilidade de obtenção do material

Materiais metálicos

- Processos podem ser semelhantes para ferrosos ou não
- Principais escolhas
 - Preço
 - Resistência
- Em seguida:
 - Condutividade elétrica | térmica
 - Resistência à corrosão
 - Outros
- Definido o projeto, simula-se com vários materiais
 - Uso de critérios técnicos para escolher

Exemplo 1

Girafa

- Definir um cronograma
- Definir materiais baseado em custo e resistência
- Decisão Comprar X Produzir
 - Matérias-primas a comprar
 - Processos de fabricação
 - Homem horas
 - Etc.

- Iniciar pelo planejamento e documentação
- Em seguida vem a fabricação
- Custo aproximado da peça a ser produzida
 - Custos para cada máquina e horas de funcionamento
 - Quantidade e tempo de operadores
 - Custo de armazenamento produto final e matéria-prima
 - Custo administrativo, máquinas, processos, espaço
- Comparar com custo de comprar
 - Considerar disponibilidade, prazos, qualidade, etc.

- Custos fixos
 - Aluguel
 - Administrativo
 - Água e E.E. não utilizados diretamente na produção
 - Compra de equipamentos
 - Desenvolvimento
 - Impostos
 - etc.

- Custos variáveis
 - Em função das quantidades produzidas
 - Matéria-prima
 - Água e E.E. usados diretamente na produção
 - Impostos
 - etc.
- Determinar o ponto de equilíbrio
 - Entrada de dinheiro é igual à saída
- ROI

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

- A estrutura deve ser de material resistente, mas com uma certa ductilidade
 - Ligas ferrosas
 - Boa resistência e baixo custo
- Memorial de cálculo
 - Coeficiente de segurança
 - Adequação de cada material ao seu uso e esforços
 - Ferro fundido é frágil
 - Aços de baixo carbono não possuem boa resistência
 - Aços de médio carbono seriam mais adequados

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 5+
Condições ambientais nos 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+

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

- Considerando as escolhas na tabela 1.5:

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

- Pela tabela 1.6: (cabo de aço)
Fator de segurança = 5

Processos

Processos

- Cantoneiras soldadas. Definir o processo:
 - Eletrodo revestido
 - MAG
 - Arco submerso
- Depende de disponibilidade e custo do processo
 - Consumíveis
 - Capacidades
 - Homem-hora
 - Qualidade

- Cabo de aço e parafusos: comprados
- Gancho: forjado
- Catraca, engrenagens, rodas: comprados

Referências

BUDYNAS, R. G. Elementos De Maquinas De Shigley. 8ª edição. [S. l.]: AMGH, 2011.

COLLISN, J. A.; BUSBY, H. R.; STAAB, G. H. Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: uma Perspectiva de Prevenção da Falha. 2ª edição. [S. l.]: LTC, 2019.

LOBO, Y. R. de O.; JÚNIOR, I. E. de O.; ESTAMBASSE, E. C.; SHIGUEMOTO, A. C. G. Projeto de máquinas. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

NORTON, R. L.; BOOKMAN, E.; STAVROPOULOS, K. D.; AGUIAR, J. B. de; AGUIAR, J. M. de; MACHNIEVSCZ, R.; CASTRO, J. F. de. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 4ª edição. [S. l.]: Bookman, 2013.

APOSTILA
do Prof. Eduardo

<https://github.com/efurlanm/teaching/>

Prof. Eduardo Furlan
2023

