



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Elementos de Máquinas para Automação

PMR 3307 - A02

Comportamento dos Materiais

2020.2



Cronograma de aulas

Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
18.08	3ª	A1	Introdução a disciplina Modelagem, carregamento e equilíbrio	RS
21.08	6ª	A2	Comportamento mecânico dos materiais	RS
25.08	3ª	A3	Composição de tensões Estado plano de tensões – Círculo de Mohr	RS
28.08	6ª	A4	Teorias de Falha: 1) Falha por deformação excessiva; fundamentos	RS
01.09	3ª	A5	Teorias de Falha: 2) Falha por deformação permanente: von Mises, Tresca, Coulomb-Mohr;	RS
04.09	6ª	A6	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 1	RS
08.09	3ª	A7	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 2	RS
11.09	6ª	A8	Teorias de Falha: 4) Falha por instabilidade: flambagem	RS
15.09	3ª	A9	Teorias de Falha: 5) Falha por impacto: Parte - 1	RS
18.09	6ª	A10	Teorias de Falha: 6) Falha por impacto: Parte - 2	RS
22.09	3ª	A11	Teorias de Falha: 6) Falha por desgaste excessivo	RS
25.09	6ª	A12	Fixações cubo-eixo	NG
29.09	3ª	A13	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Rebites	NG
02.10	6ª	A14	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 1	NG
06.10	3ª	A15	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 2	NG
09.10	6ª	A16	Especificação e dimensionamento de elementos de transmissão: Fusos	NG
13.10	3ª	A17	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 1	NG
16.10	6ª	A18	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 2	NG
20.10	3ª	A19	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 1	NG
23.10	6ª	A20	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 2	NG
27.10	3ª	A21	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Freios e embreagens	NG
30.10	6ª	A22	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Correias e Correntes	NG
03.11	3ª	A23	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 1	RS
06.11	6ª	A24	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 2	RS
10.11	3ª	A25	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 3	RS
13.11	6ª	A26	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 4	RS
17.11	3ª	---	Feriado municipal – Consciência Negra	
20.11	6ª	A27	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias de escorregamento	RS
24.11	3ª	A28	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias lineares	RS
27.11	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	RS
01.12	3ª	A30	Apresentação dos trabalhos	
04.12	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	
08.12	3ª	A30		
11.12	6ª	A31		
14.12	2ª		Encerramento do semestre 2020-2	

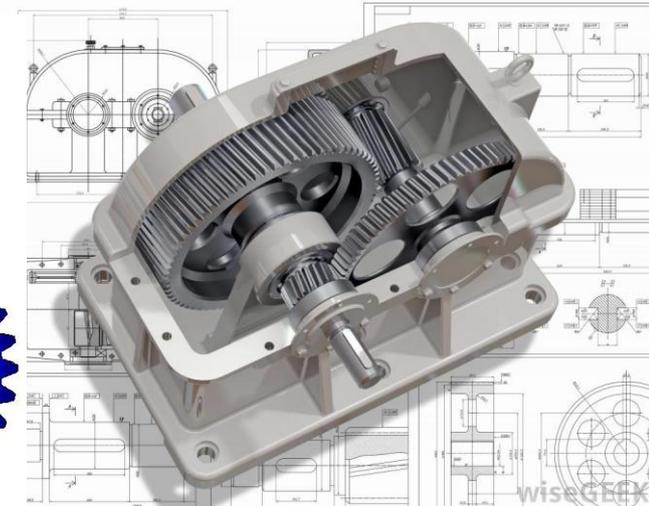
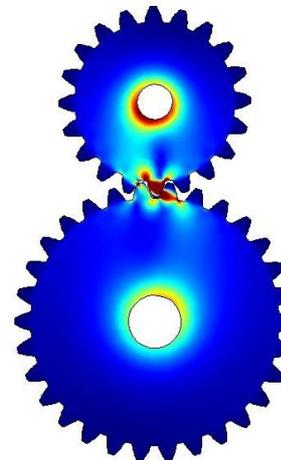
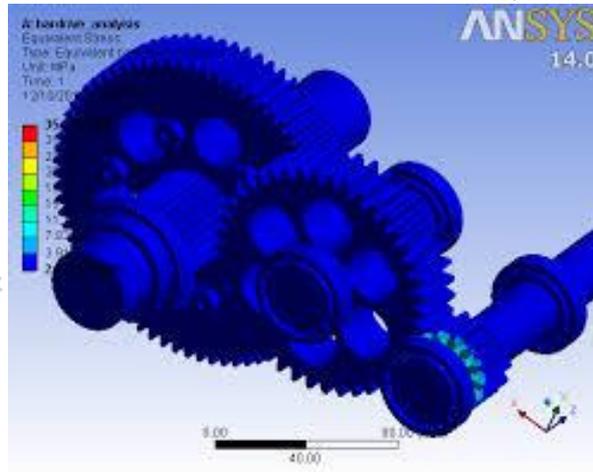
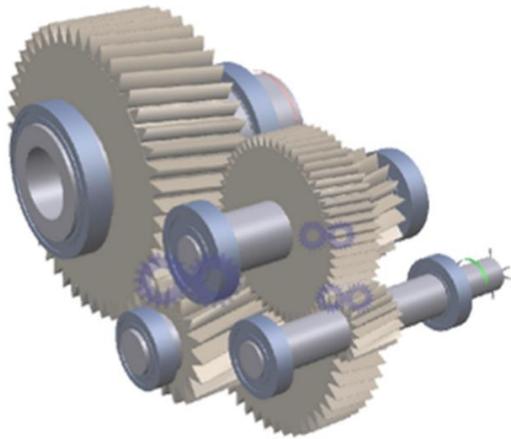
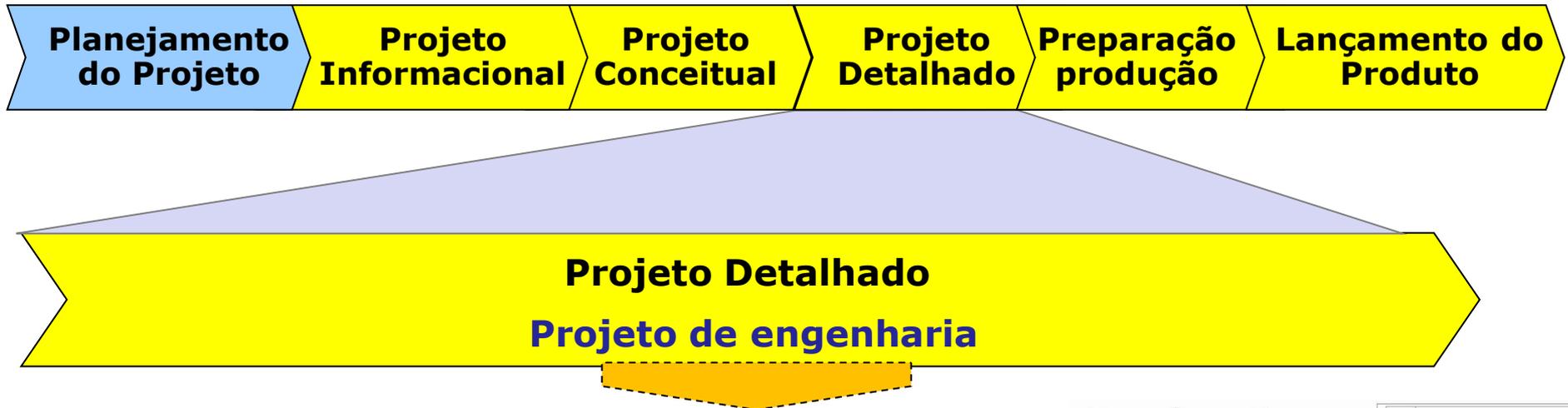


Tópicos

- ▶ Introdução
- ▶ Materiais
- ▶ Conceito de Tensão e Deformação
- ▶ Deformação, Leis constitutivas e deformação axial
- ▶ Comportamento dos materiais



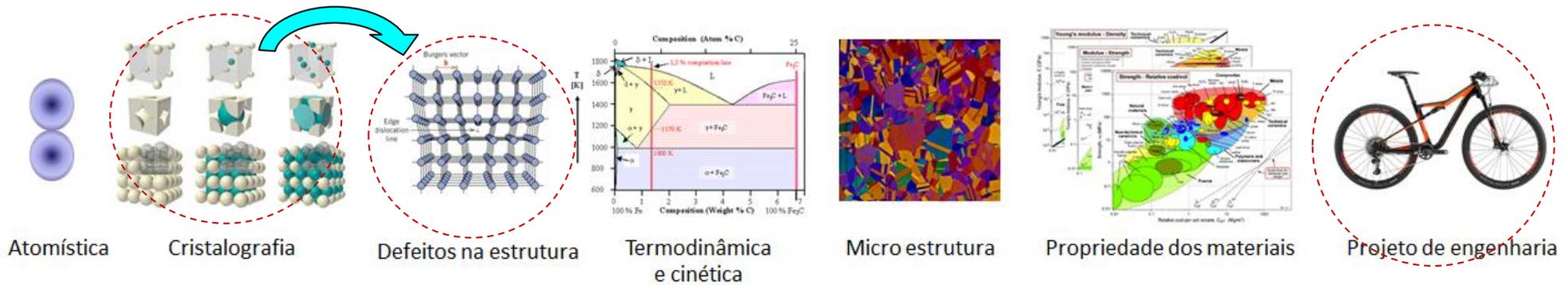
Fases do Projeto





Introdução

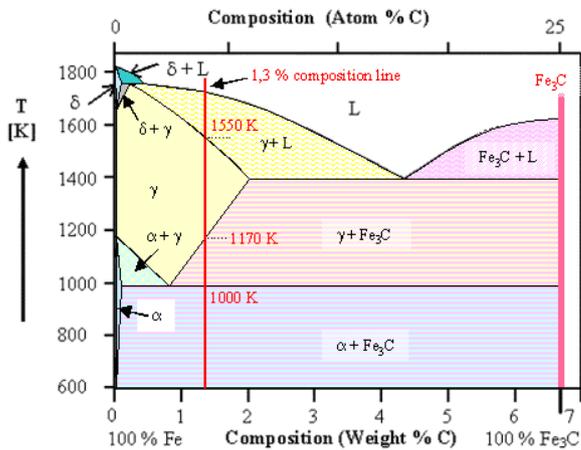
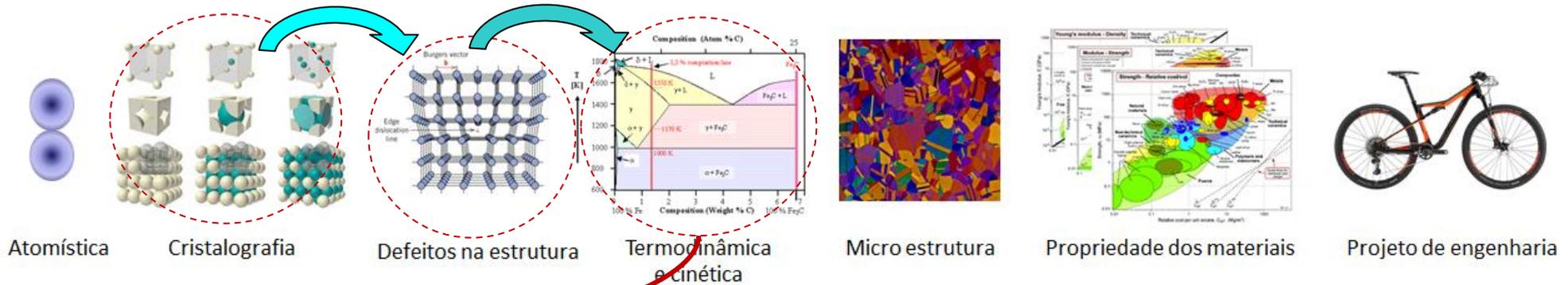
Abordagem orientada pela ciência





Introdução

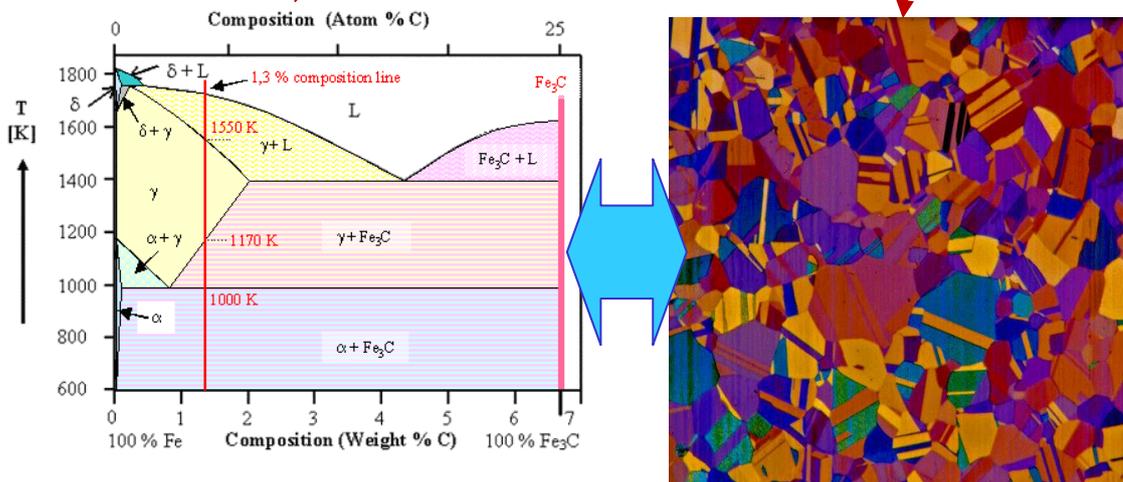
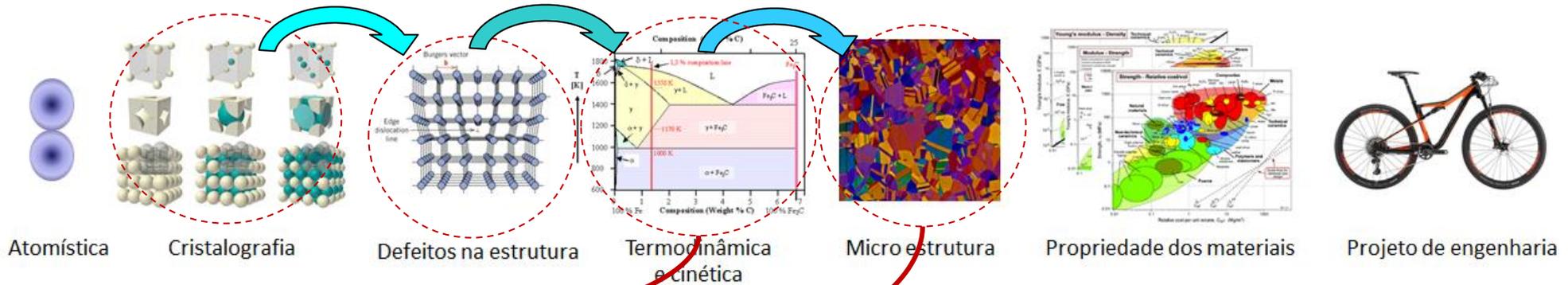
Abordagem orientada pela ciência





Introdução

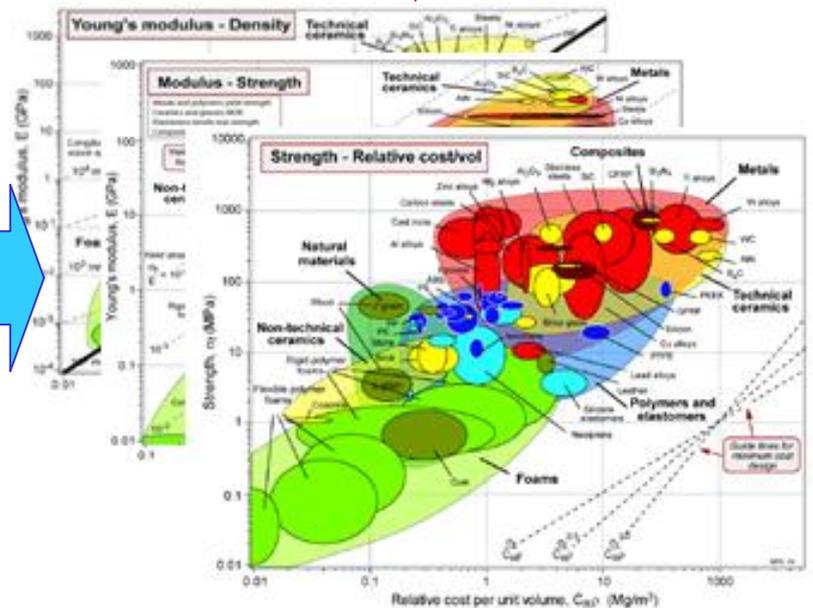
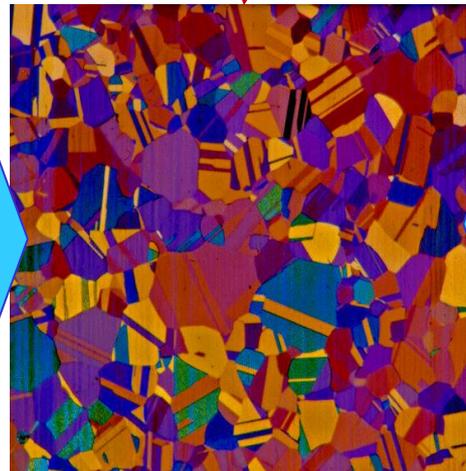
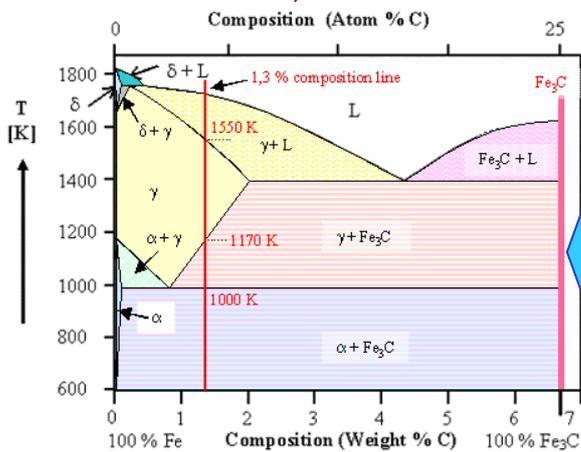
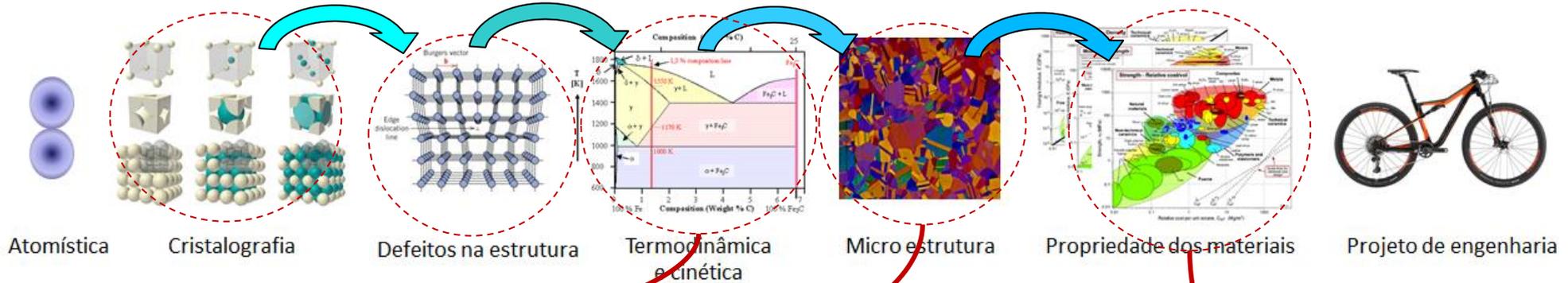
Abordagem orientada pela ciência





Introdução

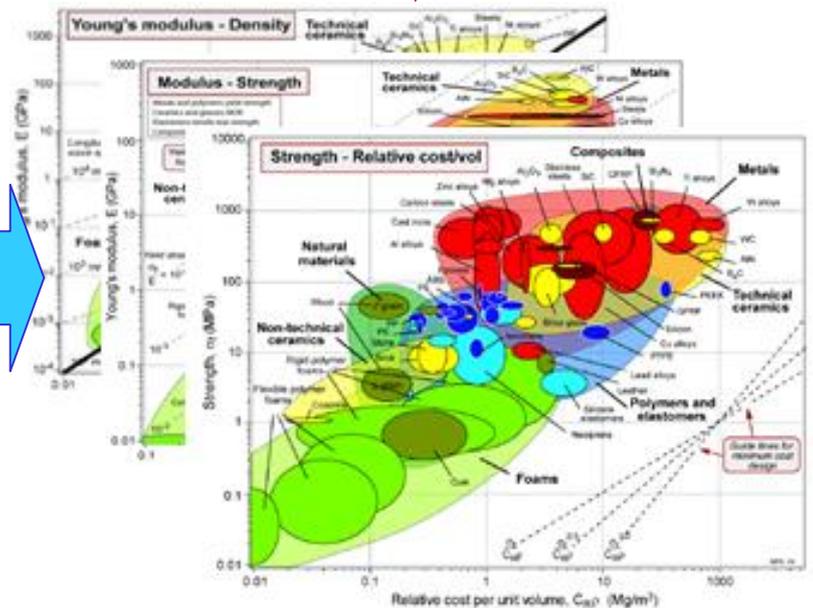
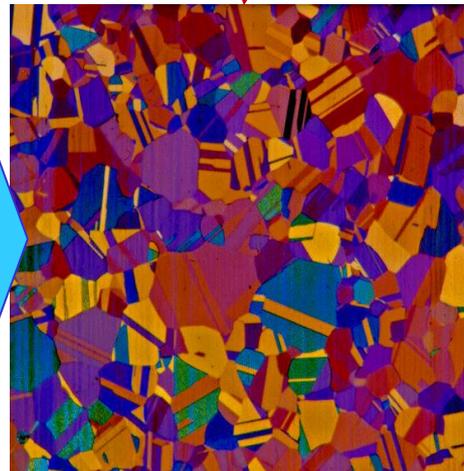
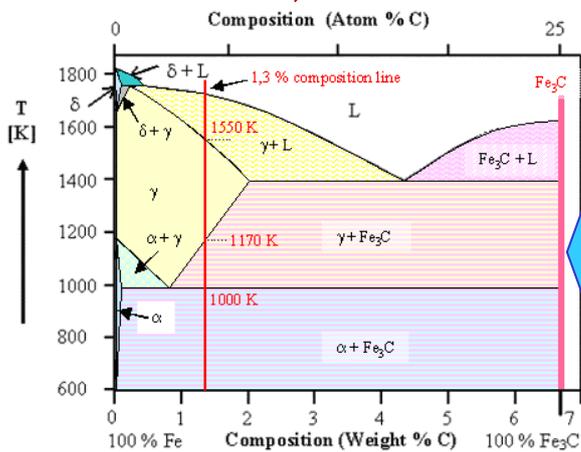
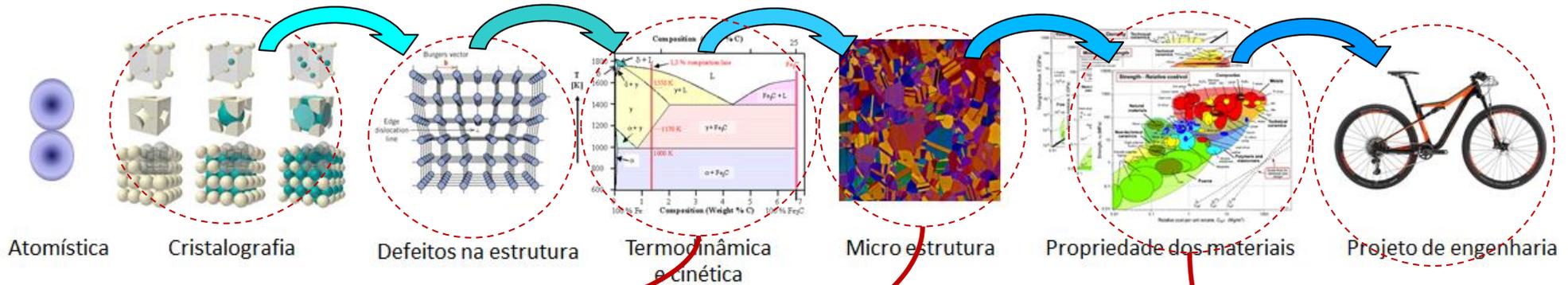
Abordagem orientada pela ciência





Introdução

Abordagem orientada pela ciência

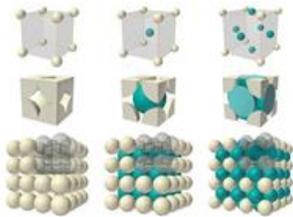




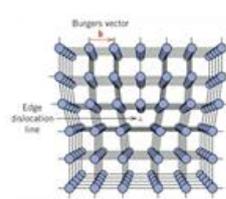
Introdução



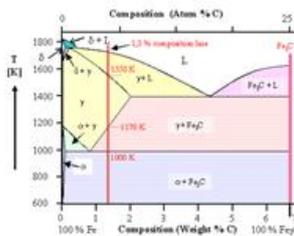
Atomística



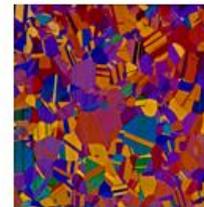
Cristalografia



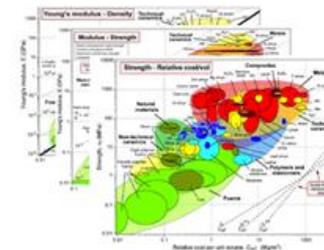
Defeitos na estrutura



Termodinâmica e cinética



Micro estrutura



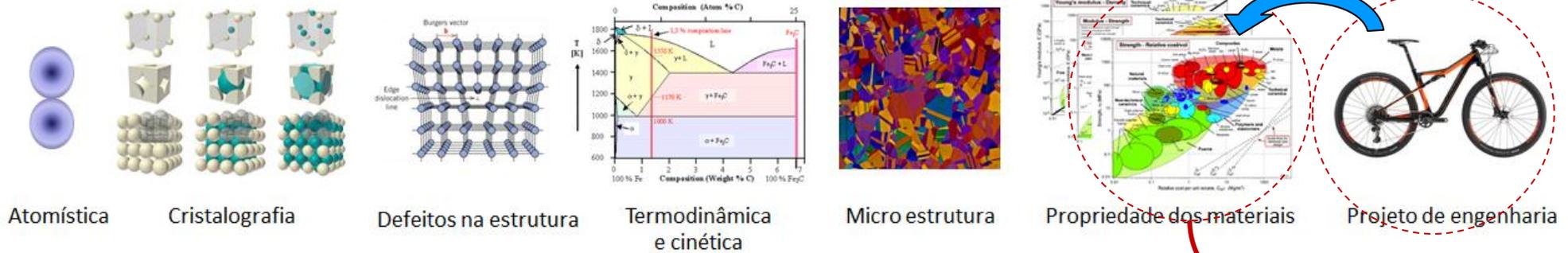
Propriedade dos materiais



Projeto de engenharia



Introdução



Atomística

Cristalografia

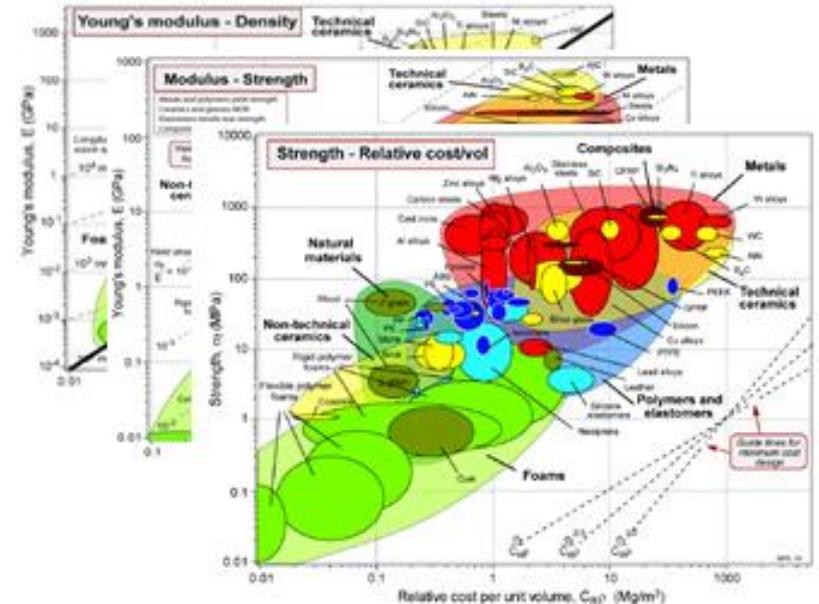
Defeitos na estrutura

Termodinâmica e cinética

Micro estrutura

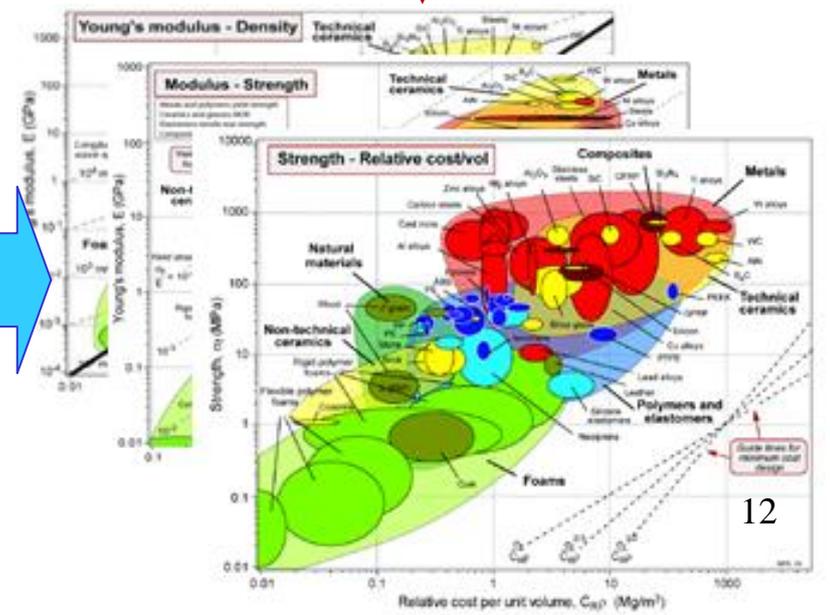
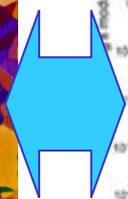
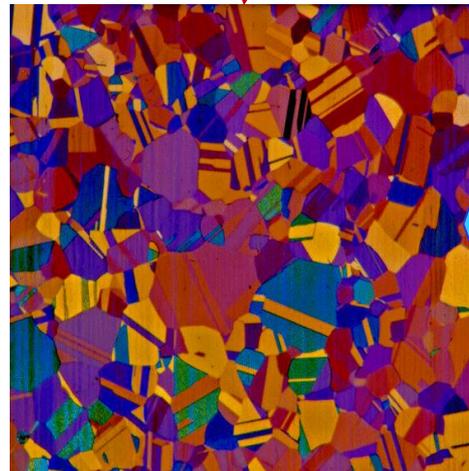
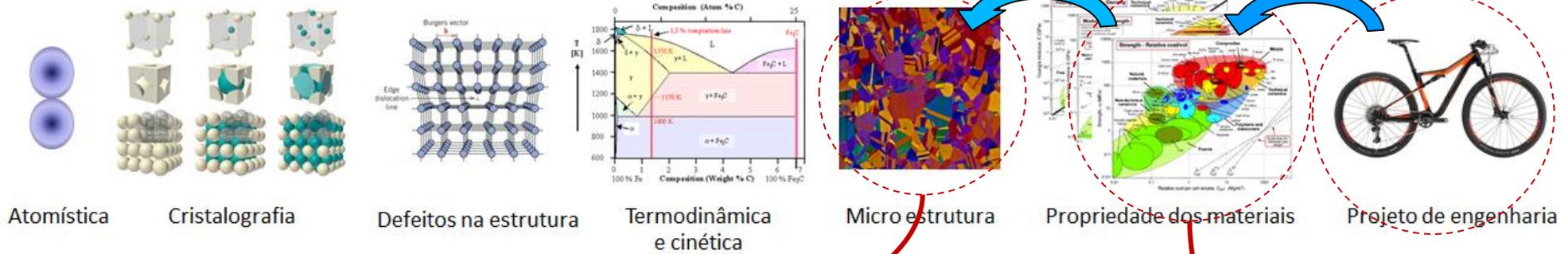
Propriedade dos materiais

Projeto de engenharia



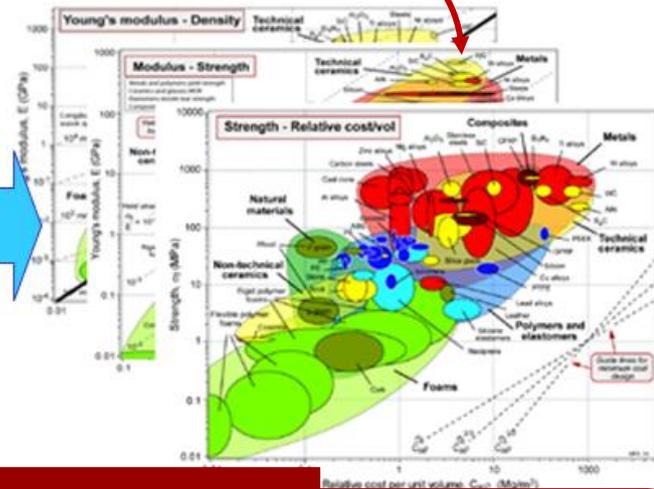
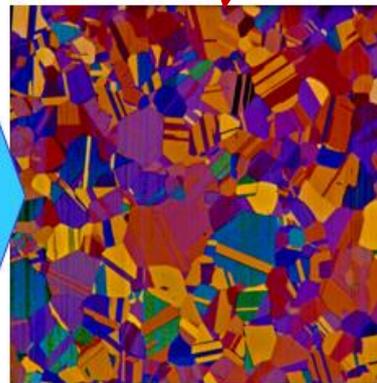
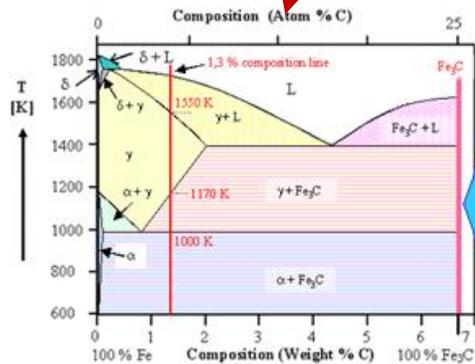
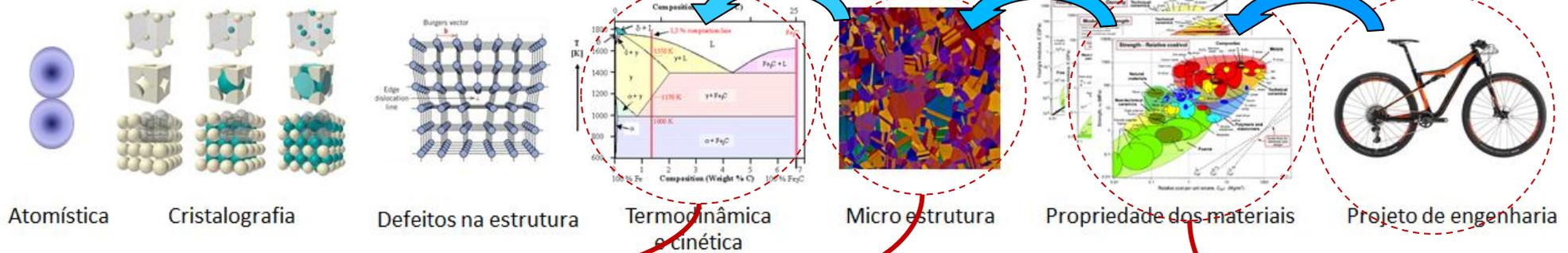


Introdução





Introdução

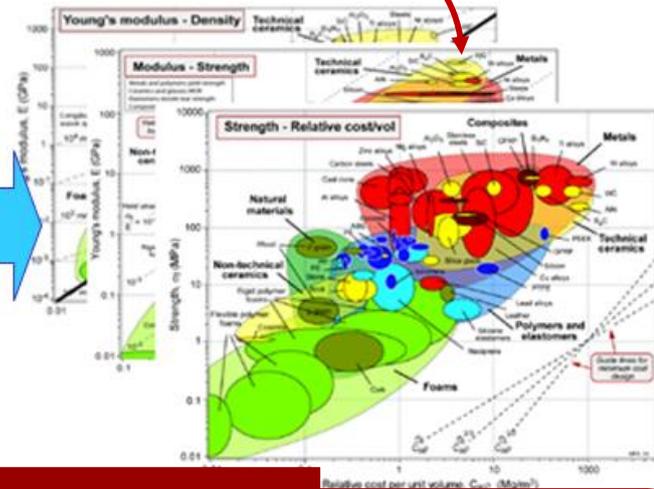
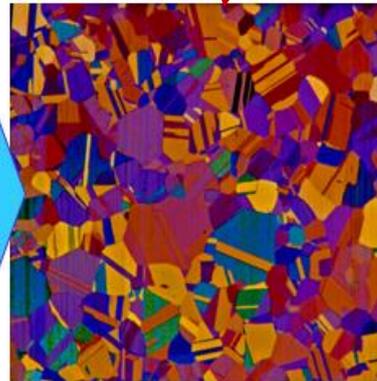
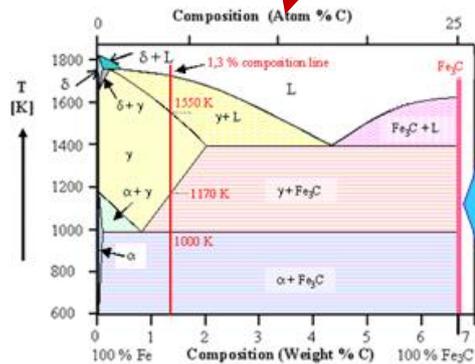
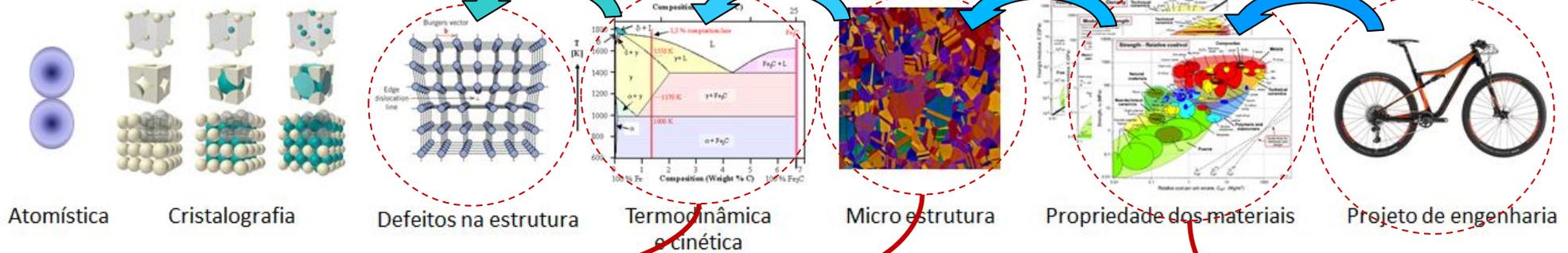


Comportamento dos materiais



Introdução

Abordagem orientada pelo projeto

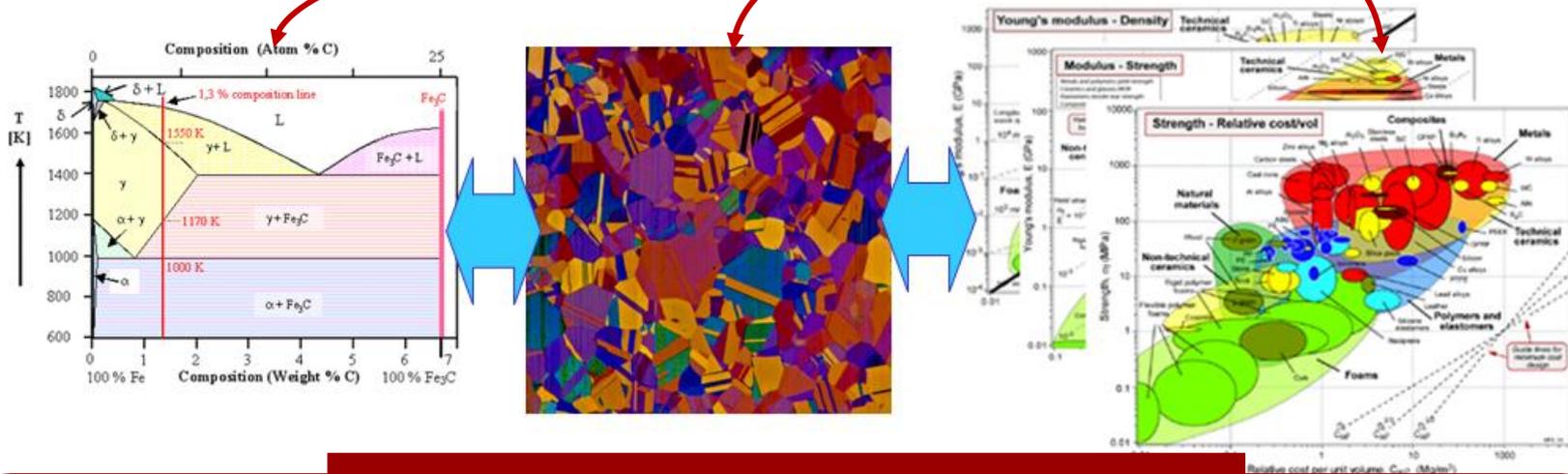
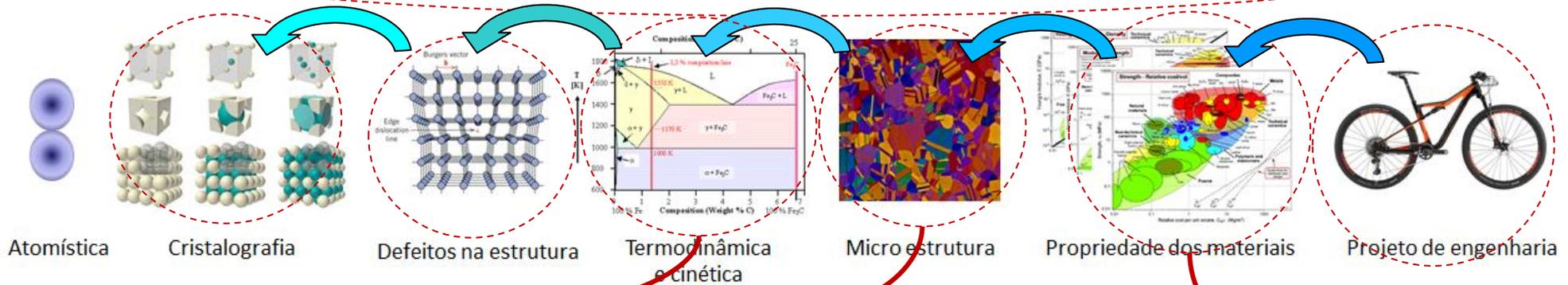


Comportamento dos materiais



Introdução

Abordagem orientada pelo projeto



Comportamento dos materiais



Comportamento dos materiais

- ▶ Sob o ponto de vista da aplicação prática, o estudo de como os materiais respondem sob a ação de carregamentos é um tópico importante no projeto e dimensionamento de elementos de máquinas
- ▶ A maioria dos componentes, mesmo quando utilizados visando outras de suas propriedades também tem que cumprir certas funções mecânicas/estruturais



Materiais

- ▶ A seleção de materiais para elementos de máquinas ou partes estruturais, é uma das decisões mais importantes que um engenheiro deve tomar durante o desenvolvimento de um projeto.
- ▶ Essa decisão geralmente é tomada antes que o dimensionamento seja realizado.
- ▶ Ainda assim o processo pode ser realimentado se as condições de carregamento ou critério de falha assim o exigirem.



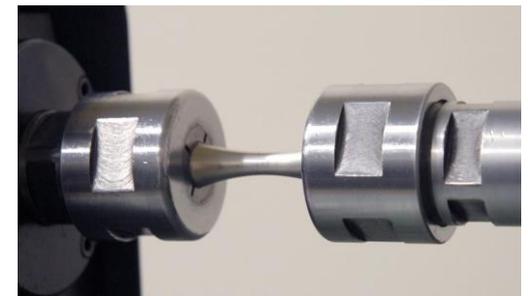
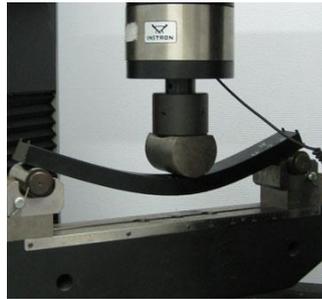
Materiais

- ▶ A escolha do material em si não termina o processo de seleção, o mesmo deve estar associado aos processos de fabricação e modificação de propriedades (ex. tratamentos térmicos).
- ▶ A seleção de materiais deve ser feita sob a óptica de **minimizar riscos**, embora em algumas vezes os mesmos devam ser aceitáveis. Neste caso existem critérios de falha que orientam a seleção de materiais.



Comportamento dos materiais

- ◆ As propriedades mecânicas mais importantes são:
 - **tensão máxima,**
 - **tensão de escoamento,**
 - **tensão de cisalhamento,**
 - **outras;** dureza, rigidez e ductilidade
- ◆ Testes experimentais para a determinação das propriedades mecânicas dos materiais tendem a reproduzir condições de uso

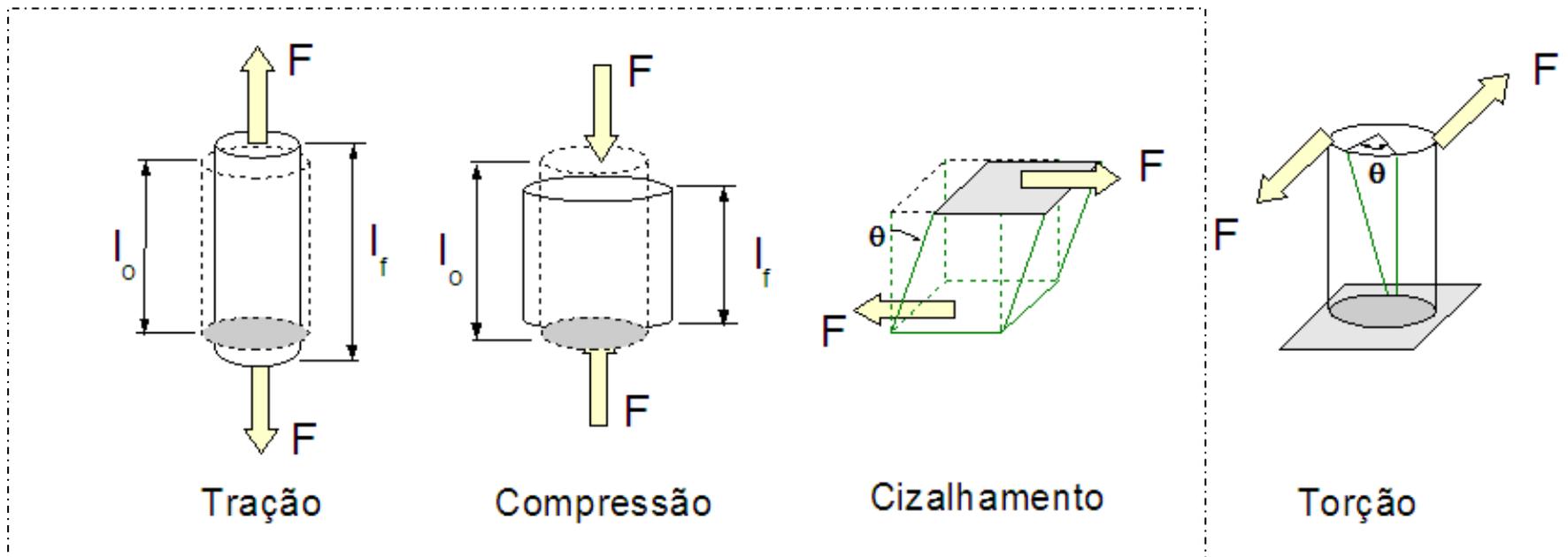


<https://www.youtube.com/watch?v=xQH3MsHHwo>



Conceito de Tensão e Deformação

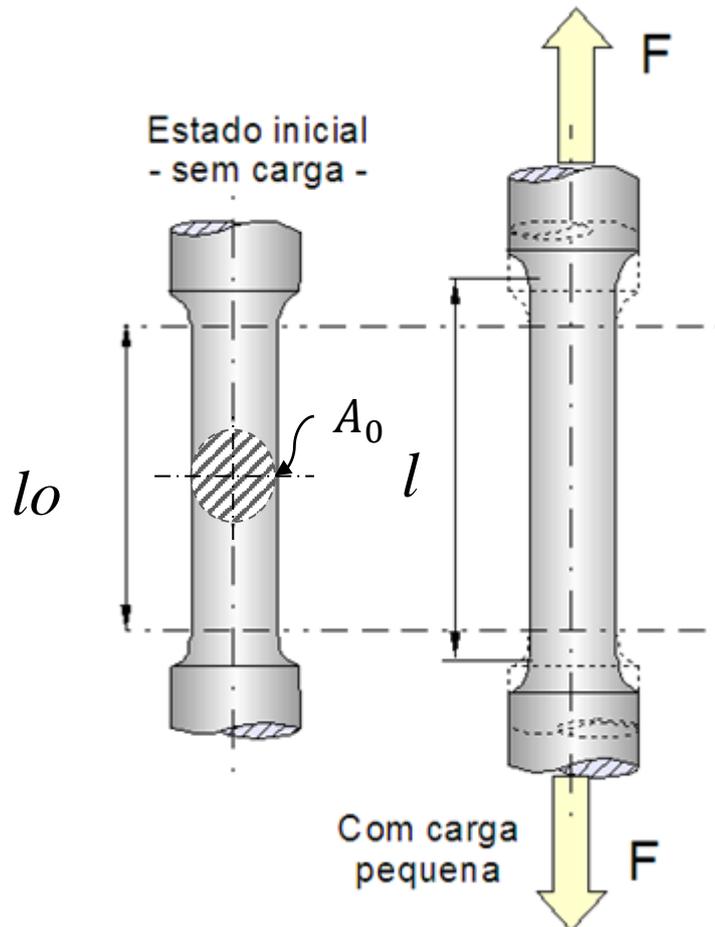
- ▶ Existem três formas principais que um carregamento pode ser aplicado: Tração, Compressão e Cisalhamento. Em termos práticos de engenharia os carregamentos podem ser torcionais ao invés de puramente de cisalhamento.





Deformação (ε)

- Sob a ação de temperatura ou carregamentos externos um corpo sólido se deforma



$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} \sigma_z + \alpha \delta T$$

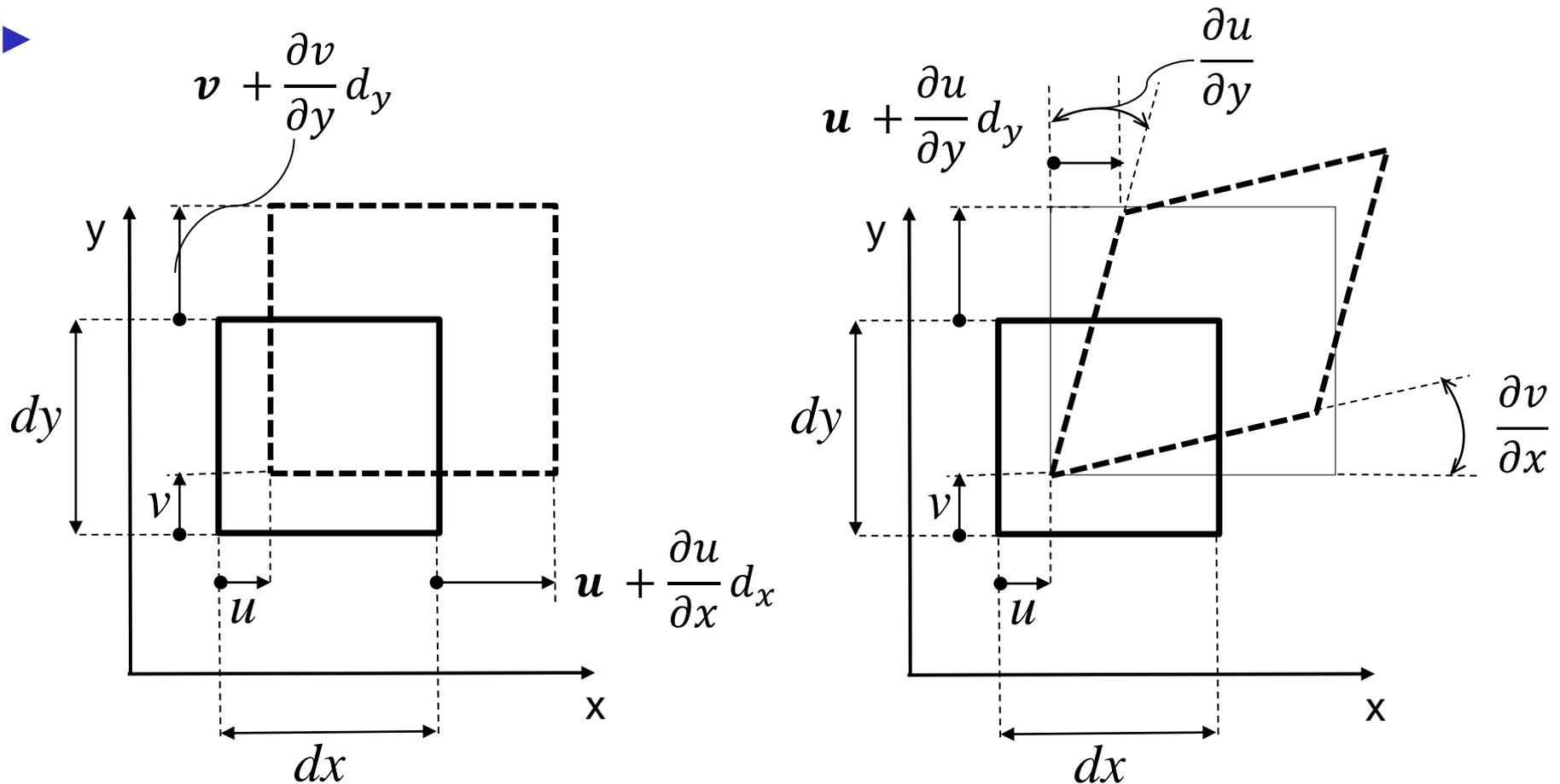
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \epsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0}$$

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l_0} \quad \varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$$



Deformação

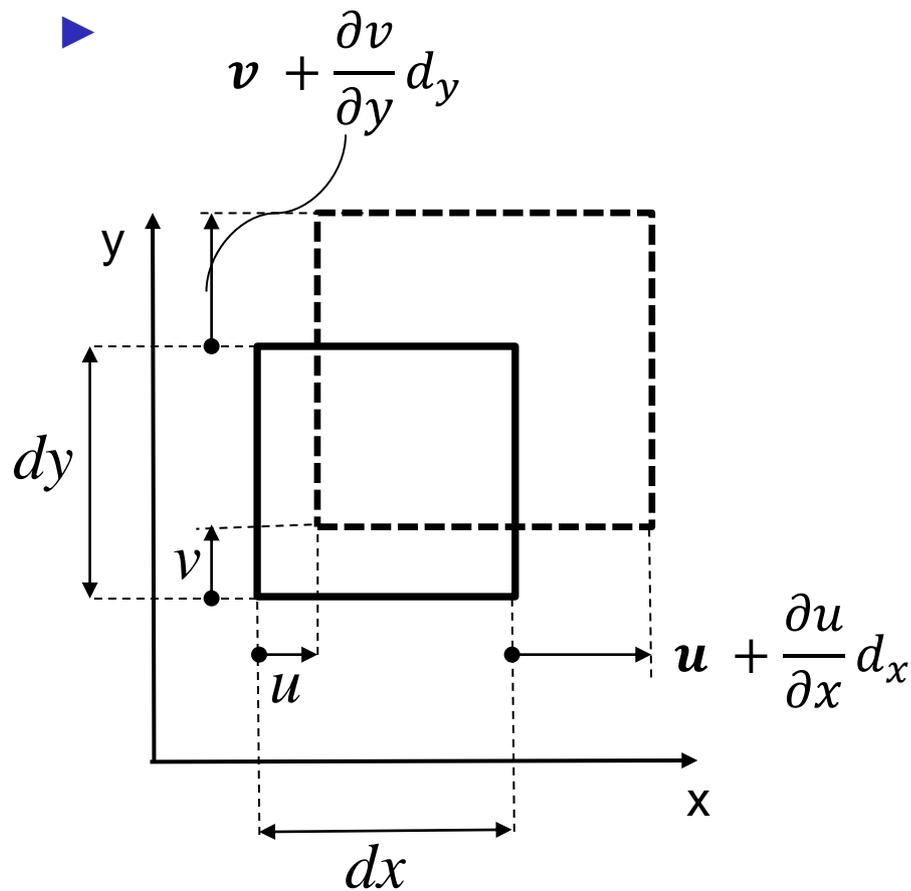
Definição matemática





Deformação

Definição matemática



$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

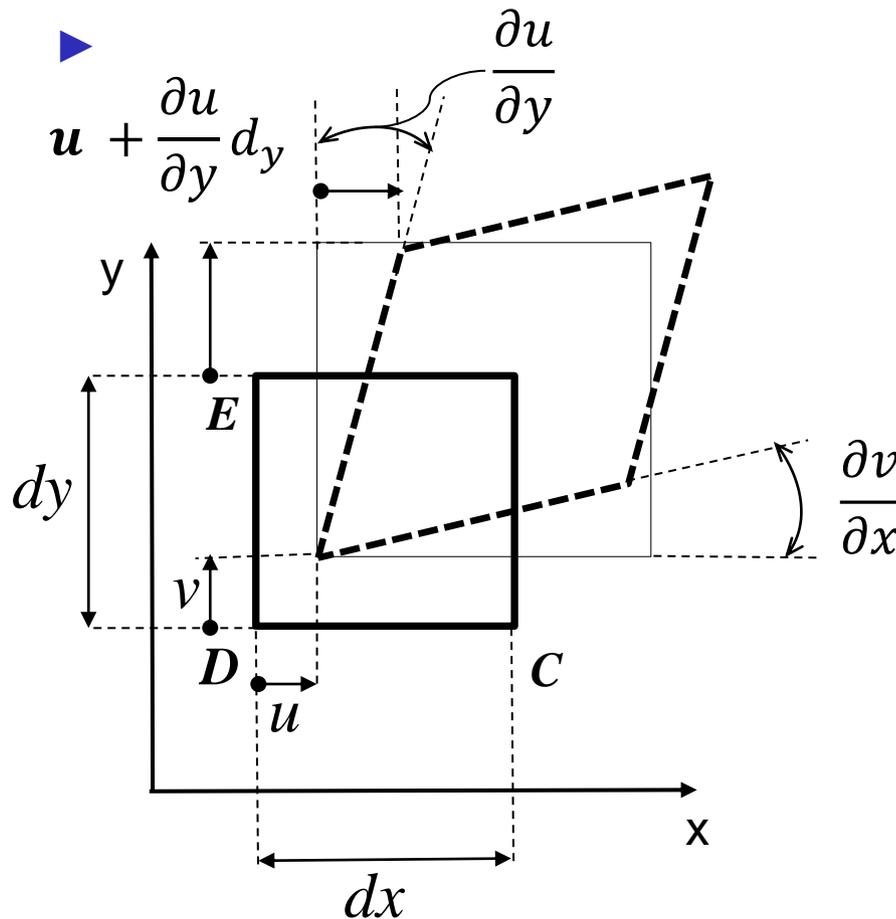
$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$



Deformação

Definição matemática



O ângulo reto $\perp EDC$ reduz-se de $(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

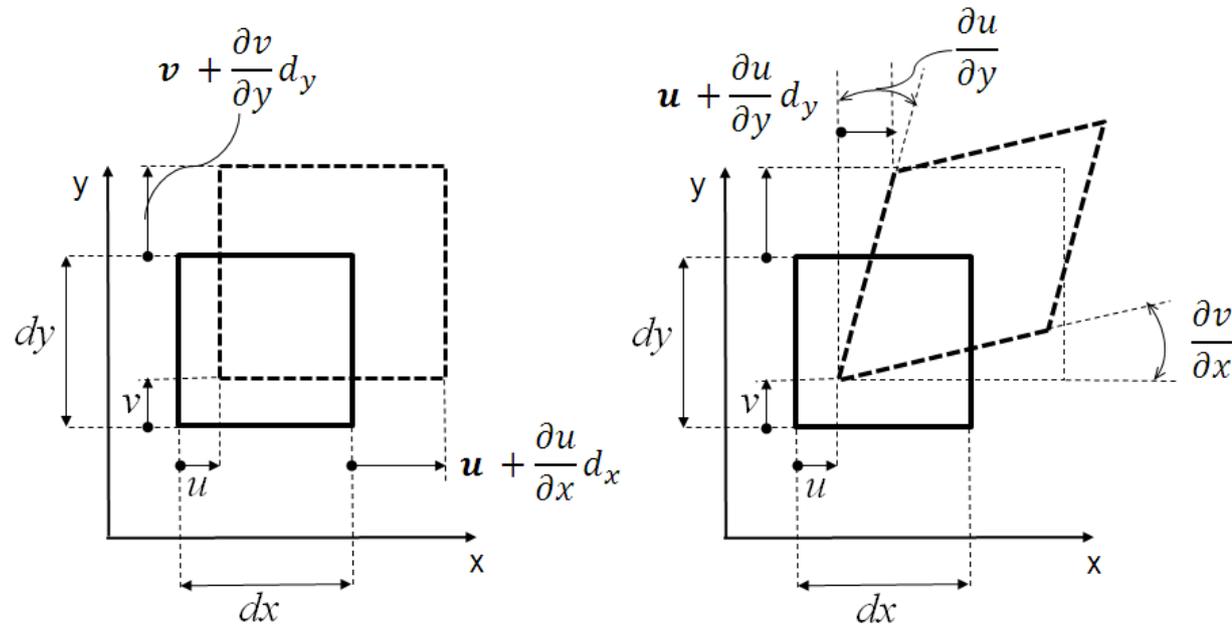
analogamente

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}$$



Tensor deformação



$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

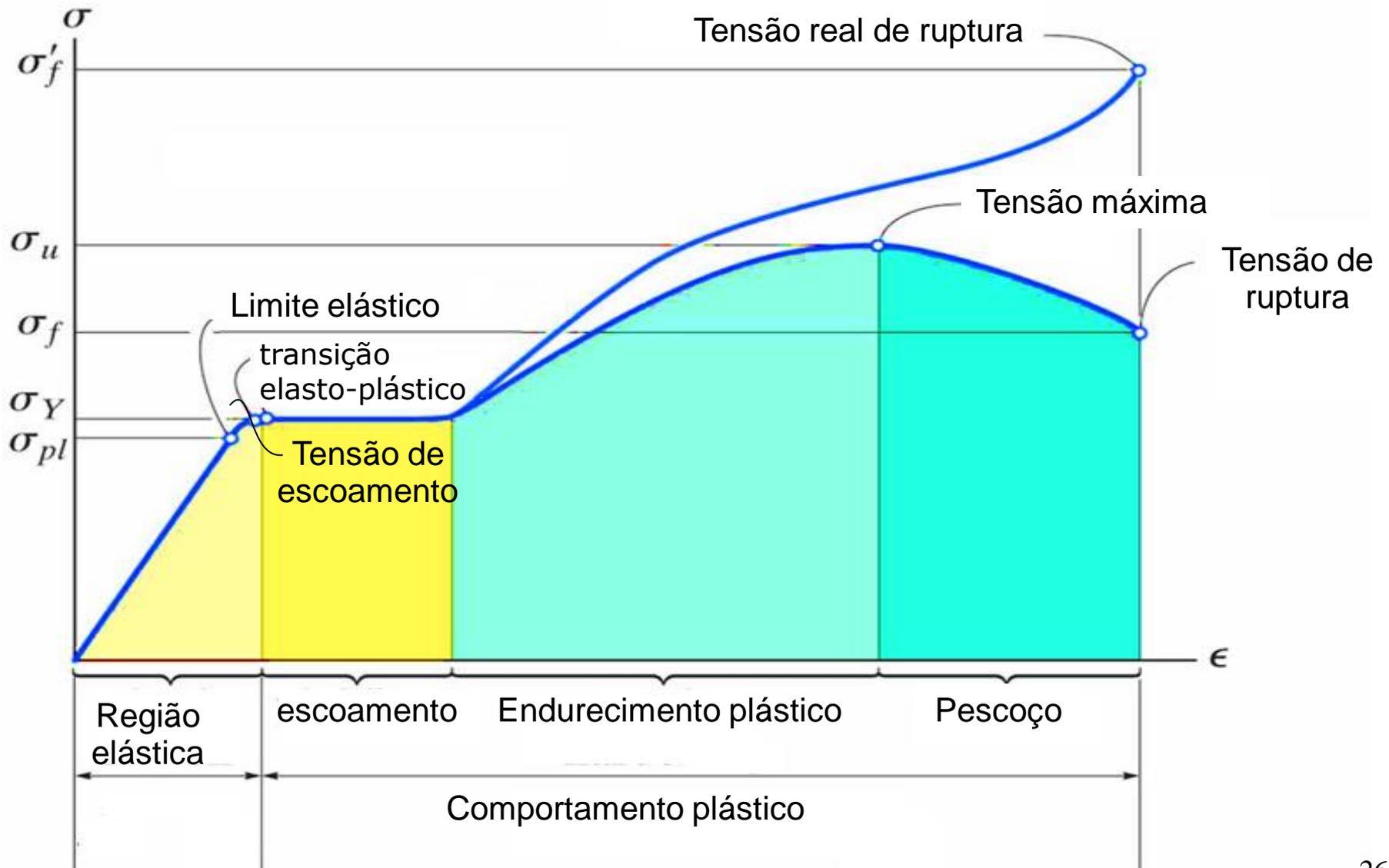
$$\epsilon_{xz} = \epsilon_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}$$



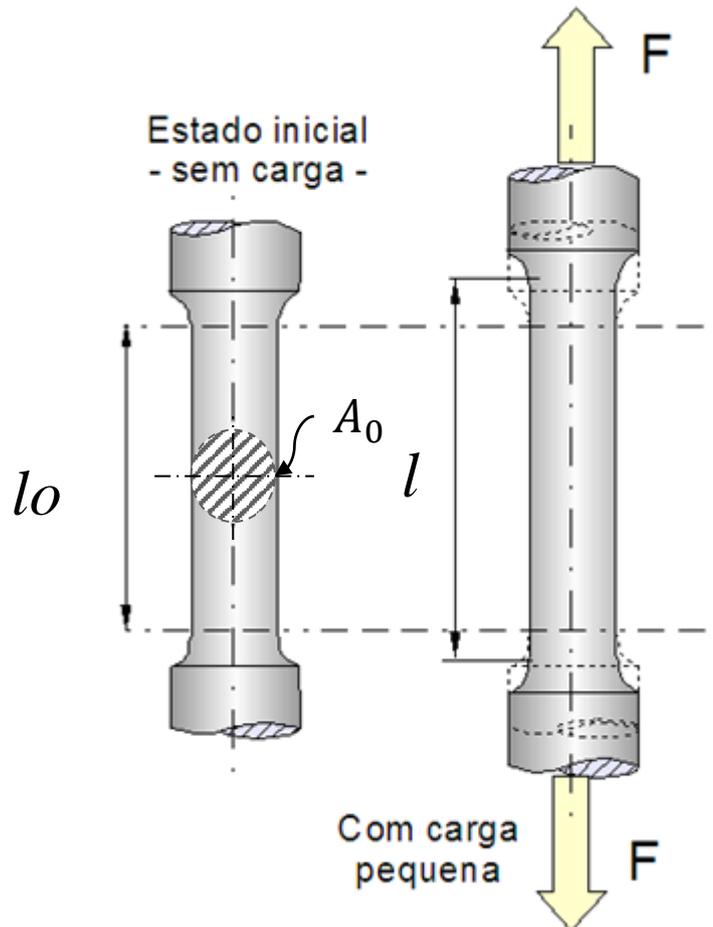
Propriedades na tração





Deformação (ε)

- Sob a ação de temperatura ou carregamentos externos um corpo sólido se deforma



$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} \sigma_z + \alpha \delta T$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0}$$

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l_0}$$

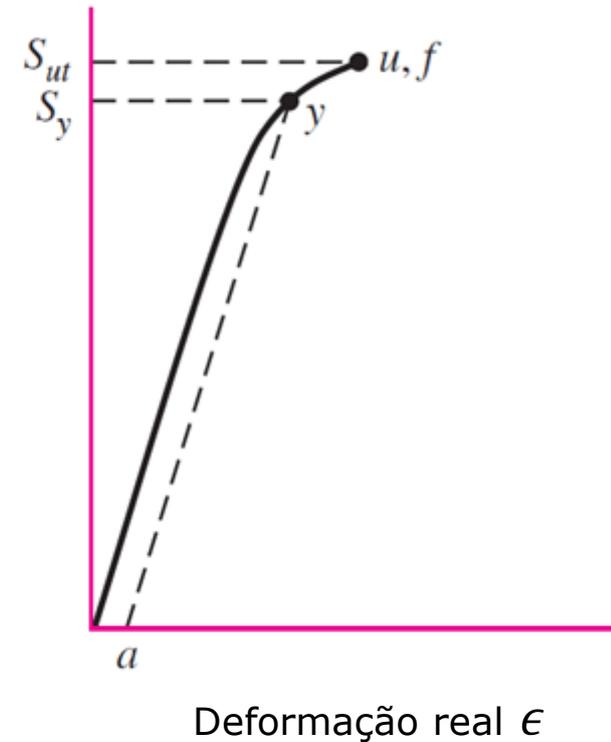
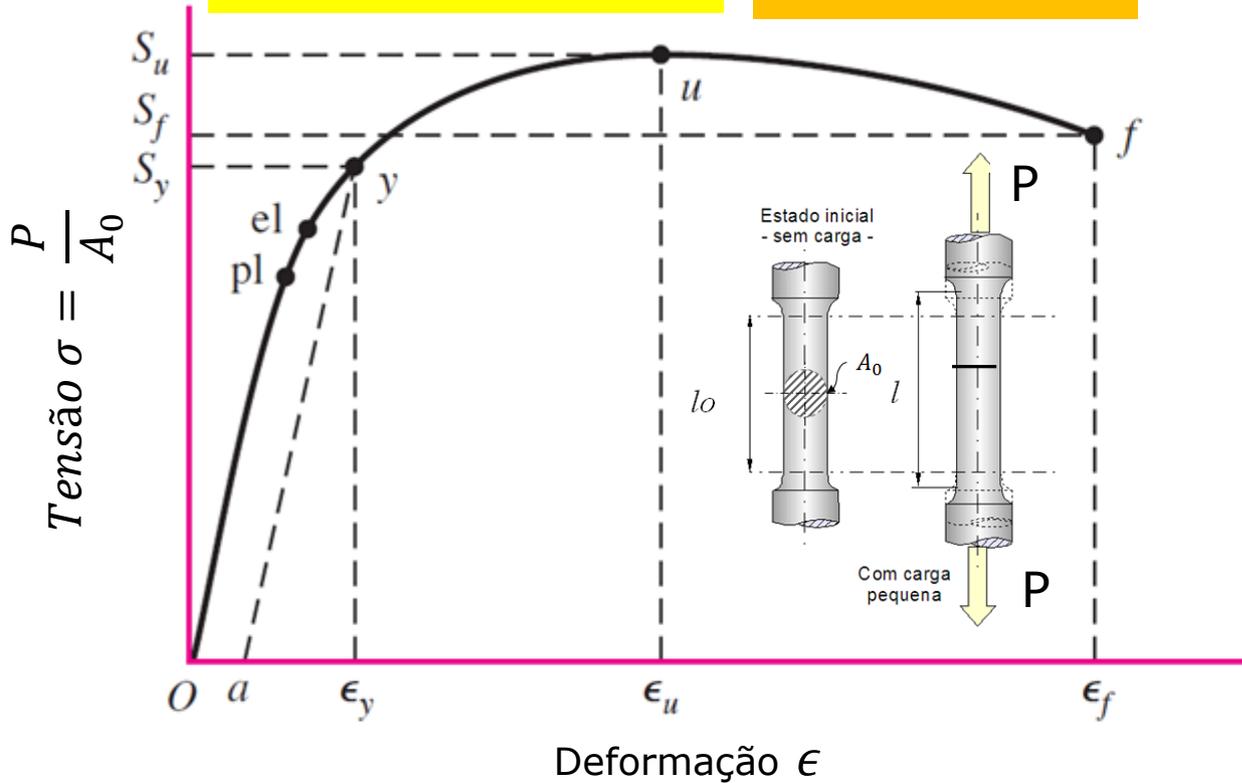
$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$$



Propriedades na tração

S ⇒ *Strength* = resistência

σ ⇒ *stress* = tensão



- ▶ pl = limite de elástico
- ▶ el = transição elasto-plástico
- ▶ S_y = limite de escoamento
- ▶ S_u = limite máximo de resistência
- ▶ S_f = tensão de ruptura

- ▶ S_{ut} = limite de ruptura
- ▶ ε_y = deformação
- ▶ ε_u = deformação máxima
- ▶ ε_f = deformação na ruptura



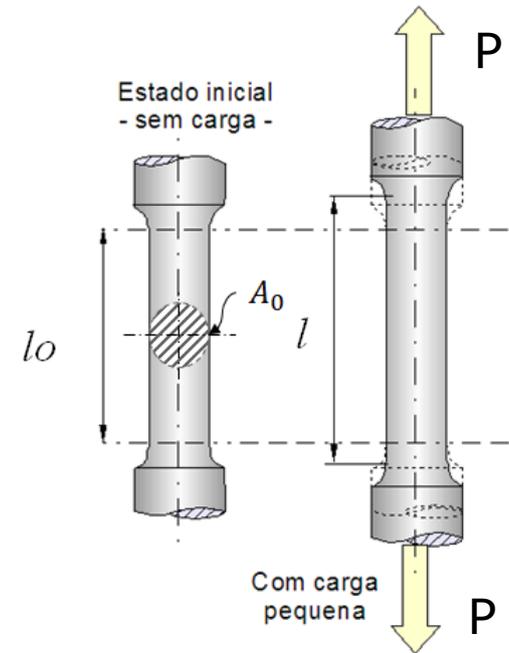
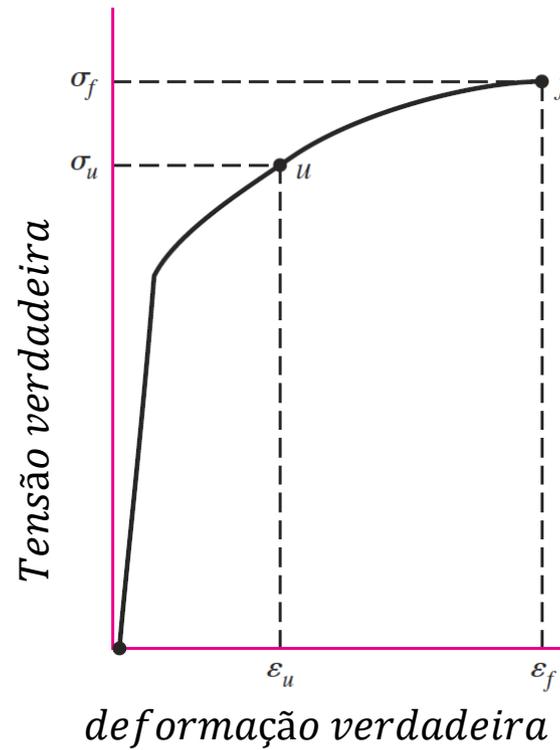
Propriedades na tração

$\sigma \Rightarrow stress = tensão$

$$Tensão \sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0}$$



- ▶ Essa equação não representam o valor real pois considera a área inicial como sendo constante, desprezando a redução da área da seção resistente causada pela estrição
- ▶ Essa equação representam o valor real pois considera a redução da área inicial causada pela estrição



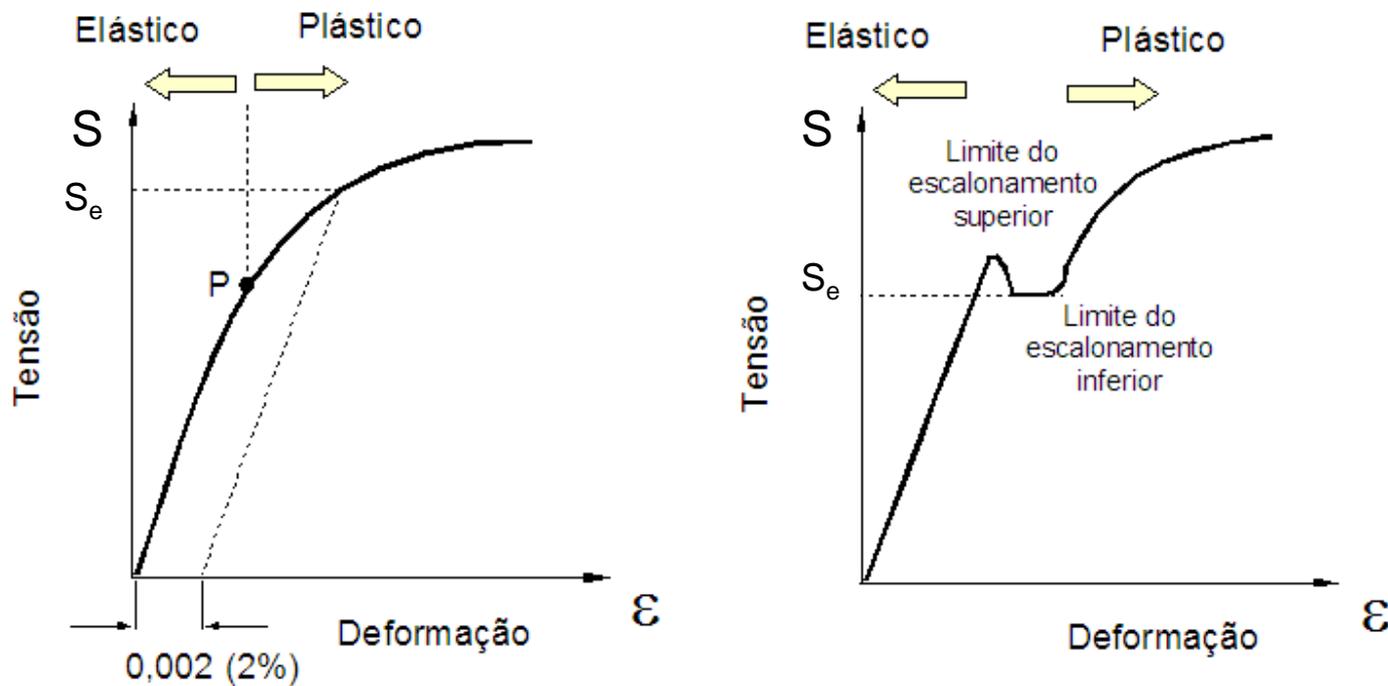
Propriedades a tração

- ▶ O limite de escoamento corresponde ao ponto onde o material começa a ter deformação plástica
- ▶ Alguns materiais apresentam um limite de escoamento, ou região de escoamento, outros não.
- ▶ Na ausência do ponto de escoamento é arbitrado um ponto de escoamento a 0,02 (2%) de deformação
- ▶ Partindo-se deste ponto traça-se uma linha paralela a linha de deformação elástica até se interceptar a curva tensão x deformação, onde se obtém um valor de tensão limite representativo para o escoamento



Propriedades a tração

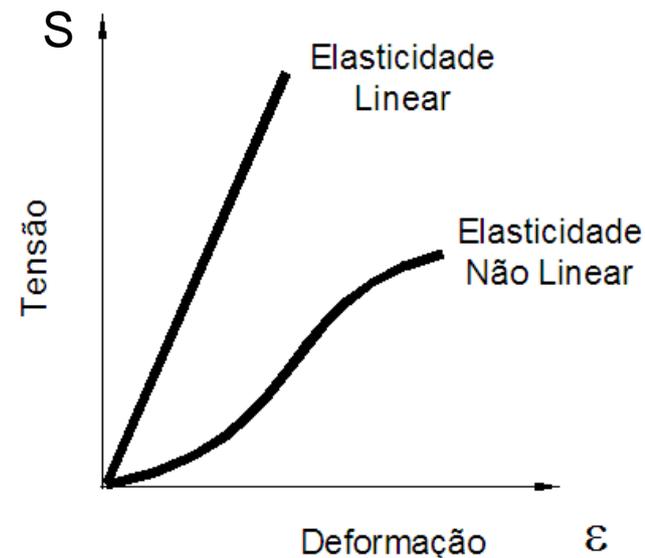
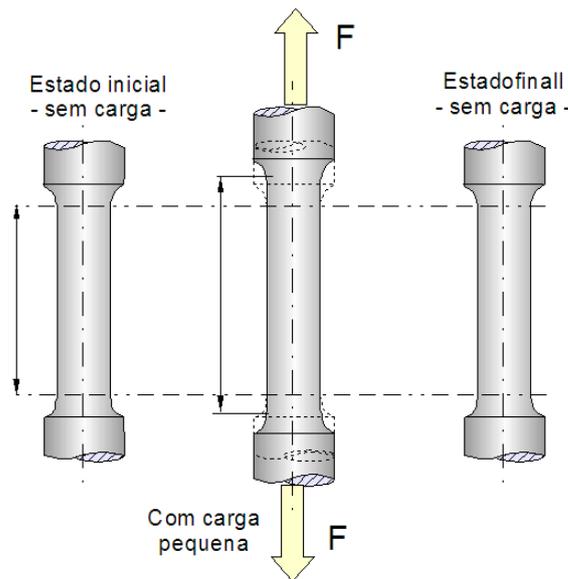
- ▶ Para aplicações estruturais a tensão de escoamento é normalmente é mais importante do que a tensão máxima, pois uma vez essa ultrapassada a estrutura deforma-se além de limites aceitáveis e tende ao colapso





Elasticidade

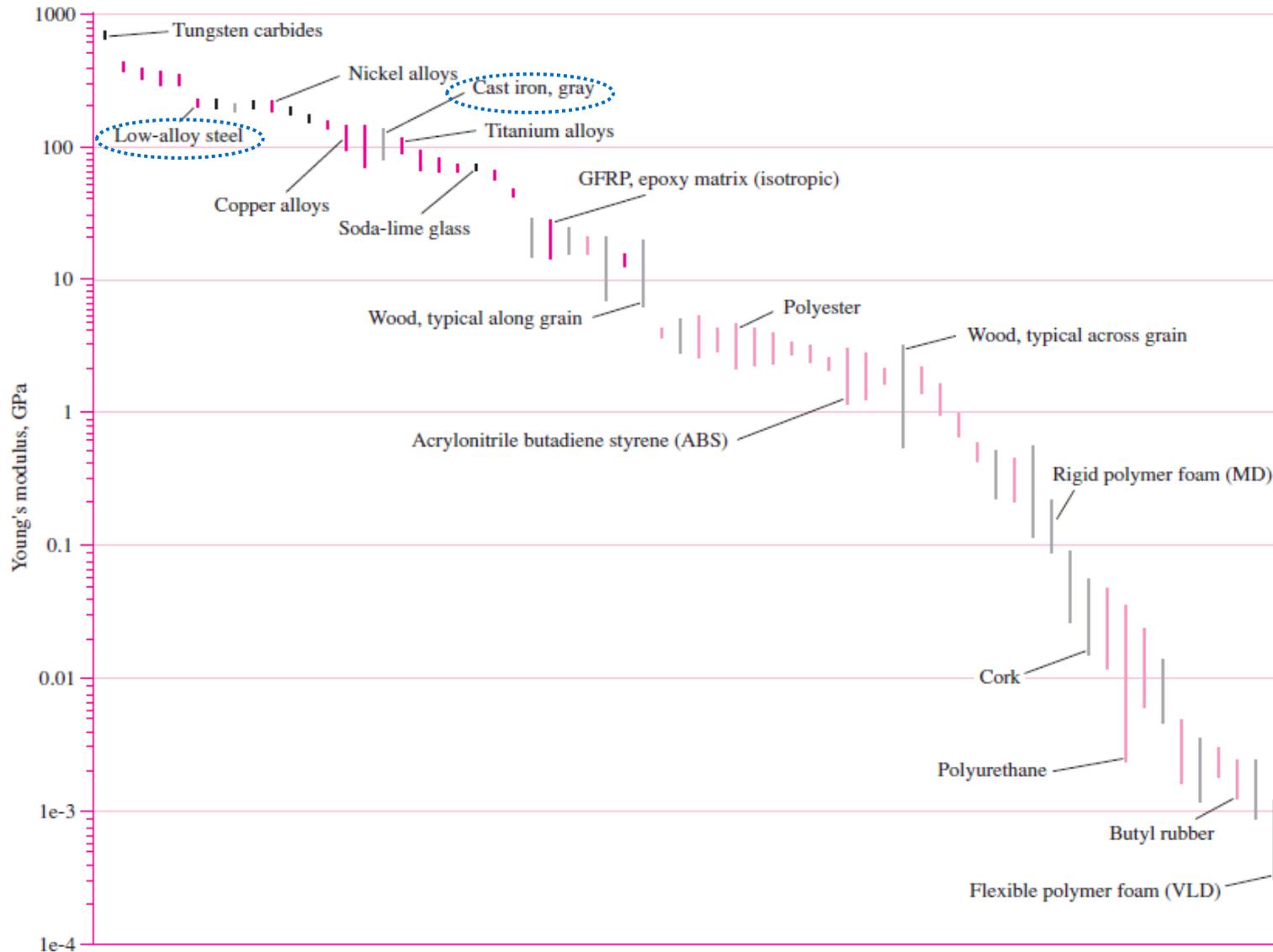
- ▶ Elasticidade representa a capacidade dos materiais de retornarem ao seu estado de deformação inicial após retirado o carregamento aplicado sobre ele



- ▶ O Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young, nos informa quanto um componente/material vai se deformar elasticamente sob carregamento

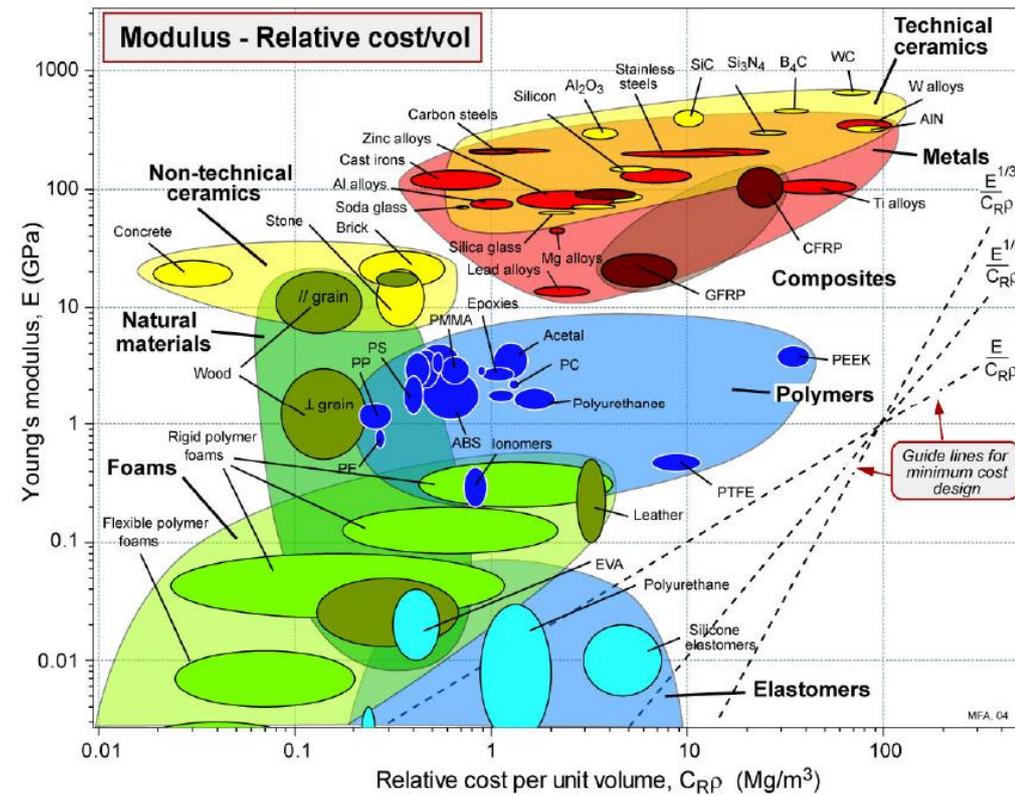
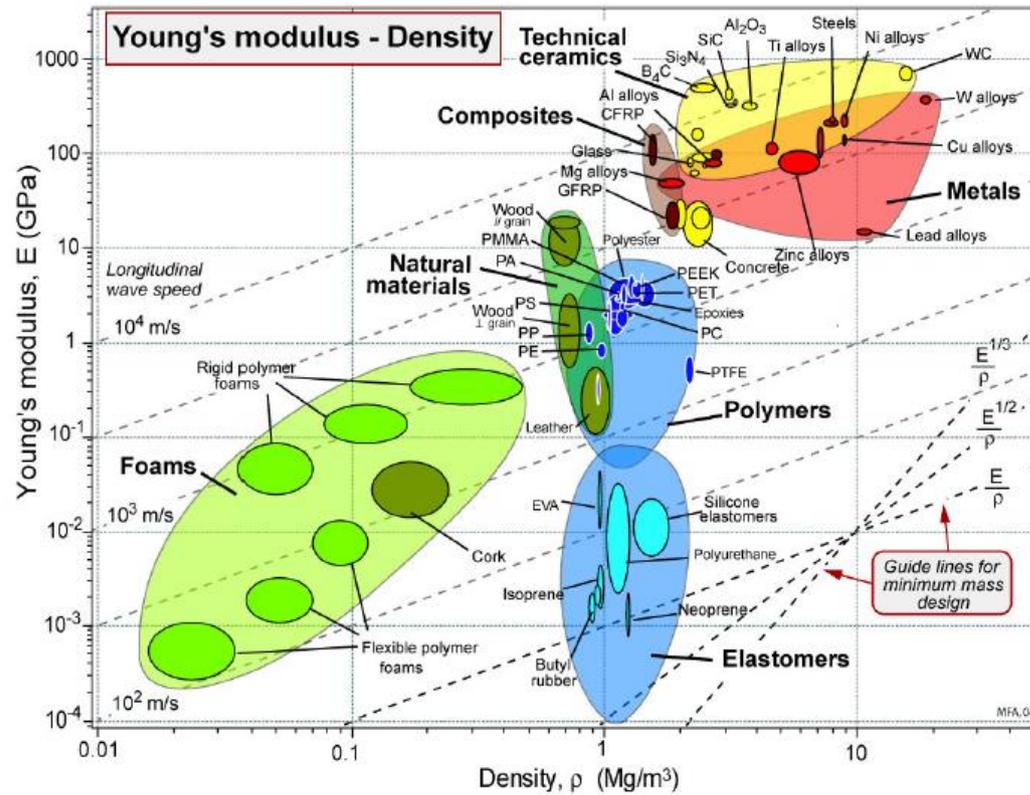


Módulo de Elasticidade





Módulo de Elasticidade



Ashby, M.F.; Materials Selection in Mechanical Design, Fourth Edition, Elsevier Science 2010



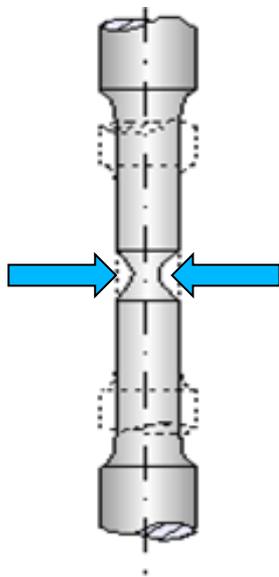
Relação de Poisson

- Quando sob tensão (Z) o corpo de prova torna-se maior e mais fino, ou seja, contração na largura (X) e profundidade (Y)
- Na compressão ele se torna mais “gordo”
- A relação de Poisson define quando e deformação lateral ocorre nas direções x e Y, quando ocorre deformação na direção Z
- Valores típicos giram em torno de 0,2 a 0,55mm²
- Para materiais isotrópicos
- Para materiais anisotrópicos E e G variam com a direção



Relação de Poisson

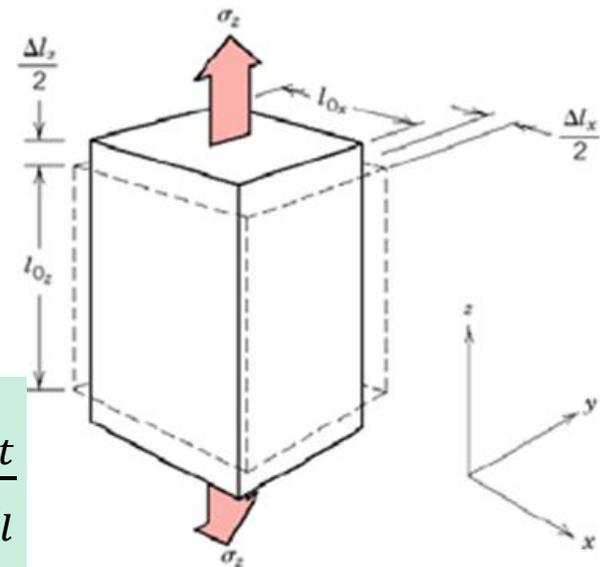
- ▶ Coeficiente de Poisson expressa a constrição transversal de um corpo submetido a um carregamento e deformação normal
- ▶ Quando sob tensão (Z) o corpo de prova torna-se maior e mais fino, ou seja, contração na largura (X) e profundidade (Y)
- ▶ A relação de Poisson define quando de deformação lateral ocorre nas direções x e Y, quando ocorre deformação na direção Z



$$\frac{\epsilon_z}{2} = \frac{\frac{\Delta l_z}{2}}{l_{0z}}$$

$$\frac{\epsilon_x}{2} = \frac{\frac{\Delta l_x}{2}}{l_{0x}}$$

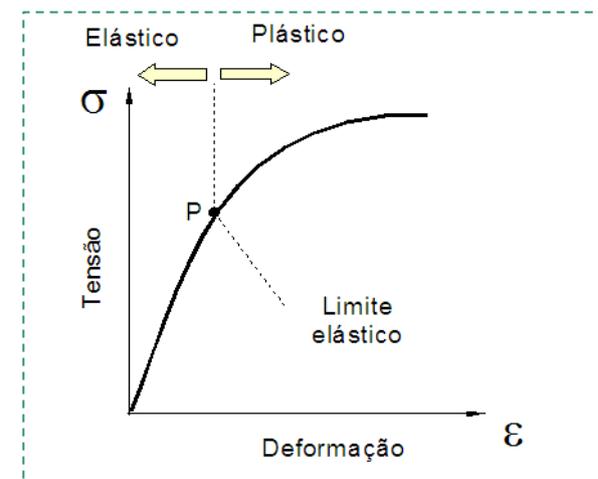
$$u = \frac{\left(\frac{\Delta l_z}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta l_x}{2}\right)} = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_l}$$





Deformação plástica

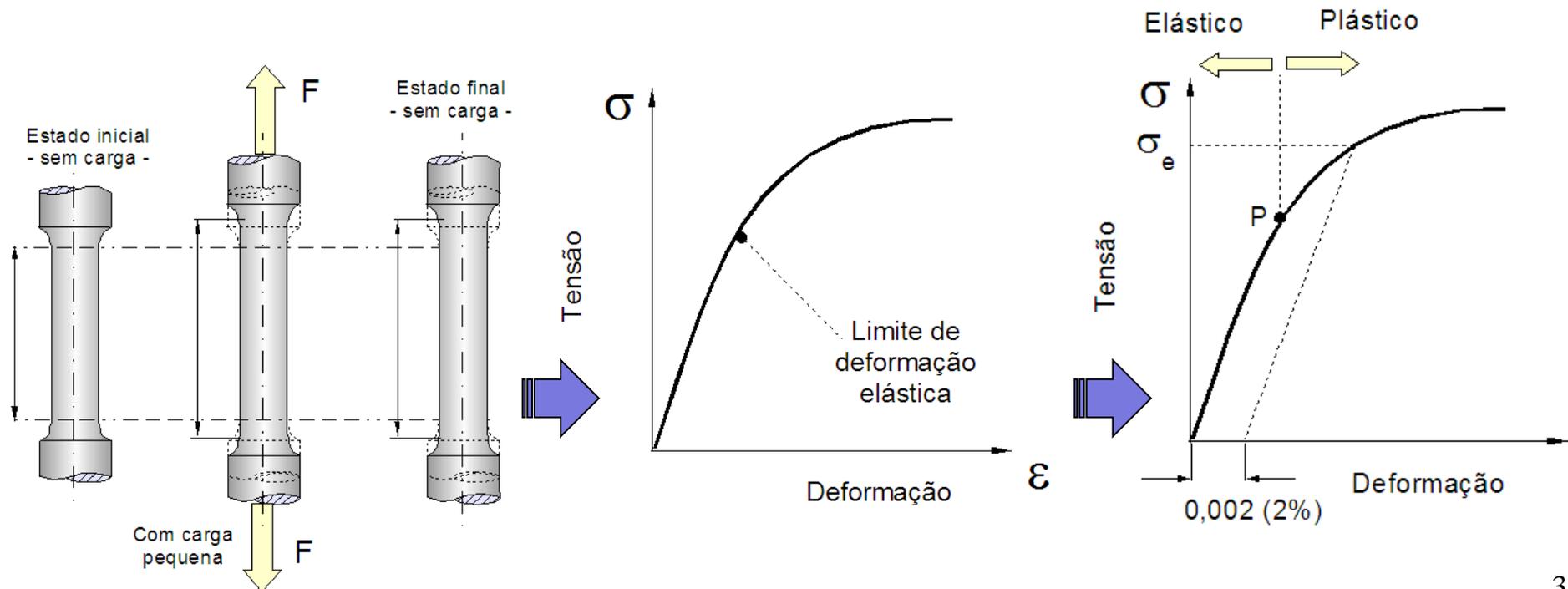
- ▶ Limite elástico é o ponto onde a curva tensão deformação torna-se não linear, ou seja, a deformação passa não ser mais proporcional a tensão
- ▶ A tensão e a deformação neste ponto são denominadas de limites proporcionais
- ▶ A partir desse ponto a Lei de Hooke não é mais válida para determinar a relação de proporcionalidade entre tensão e deformação em tração ou cisalhamento





Deformação plástica

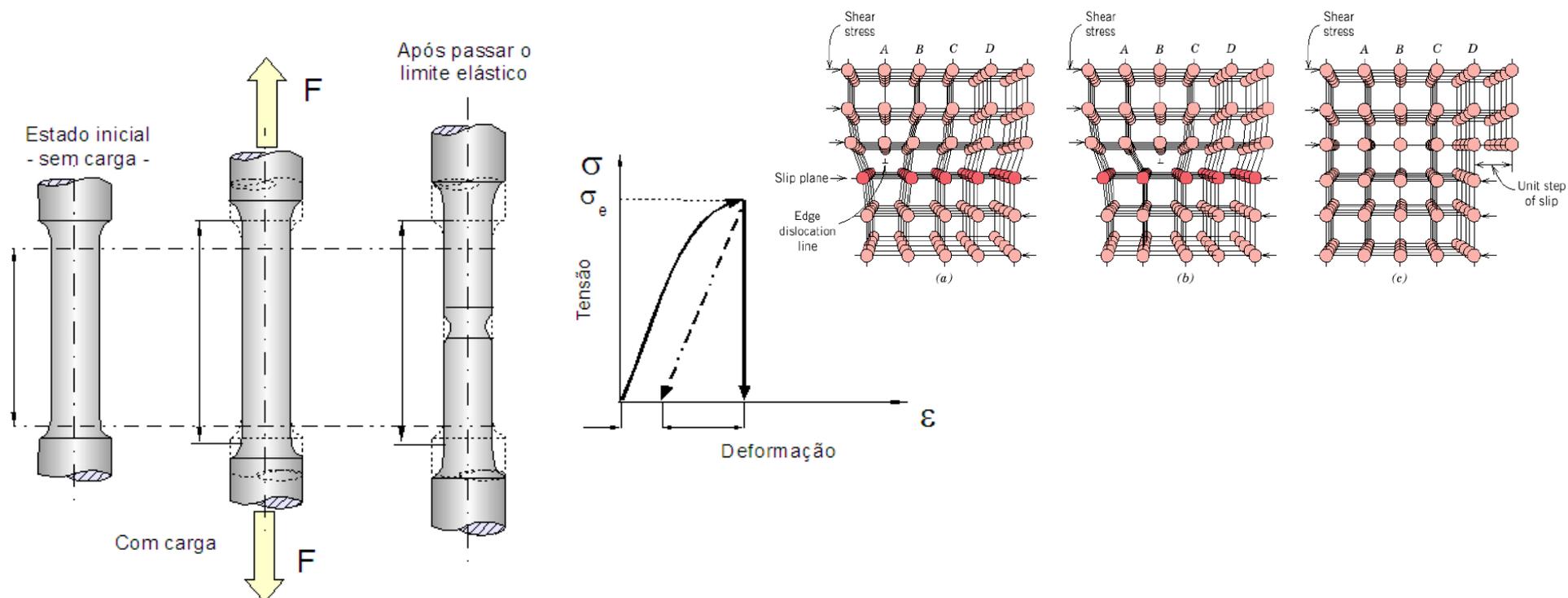
- ▶ A partir do ponto limite de deformação elástica tensão e deformação não são mais proporcionais. O que torna a deformação não é mais reversível





Deformação plástica

- ▶ A deformação ocorre pelo rearranjo das ligações atômicas. Em materiais cristalinos primariamente ocorrem pelo deslocamento das discordâncias





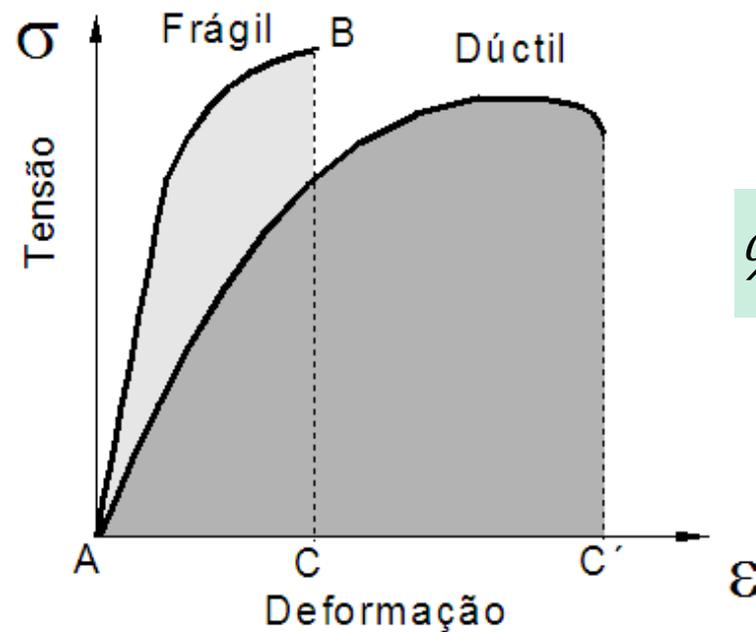
Ductilidade

- ▶ A ductilidade é a medida do grau de deformação plástica que é suportado quando da fratura
- ▶ A ductilidade permite classificar os materiais em dúcteis e frágeis
 - Materiais frágeis ==> suportam pouca ou nenhuma deformação plástica quando da fratura
 - Materiais dúcteis ==> suportam deformação plástica quando da ruptura, alguns mais outros menos



Ductilidade

- ▶ Quantitativamente a ductilidade pode ser expressa em termos de alongamento percentual, quanto em redução de área

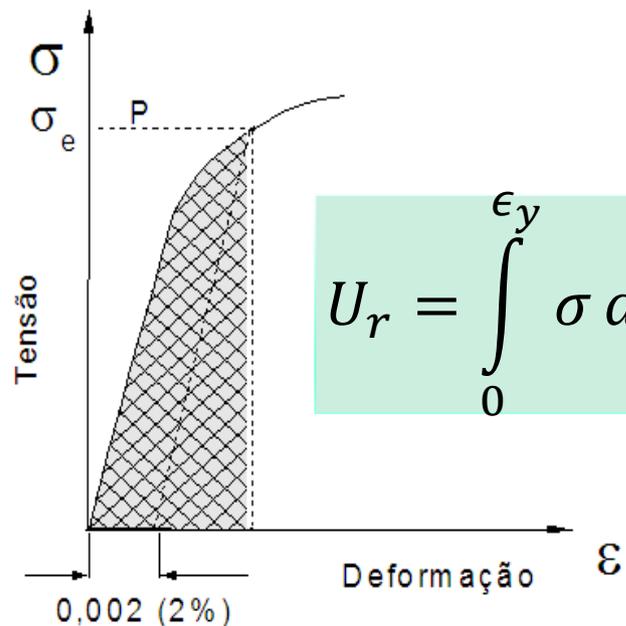


$$\%EL = \frac{(l_f - l_0)}{l_0} * 100_f$$



Resiliência

- ▶ A resiliência é a capacidade do material de absorver energia quando é deformado elasticamente e depois, com a retirada desse carregamento ter a energia recuperada
- ▶ Propriedade é representada pelo Módulo de resiliência U_r



$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

Considerando a região elástica como linear



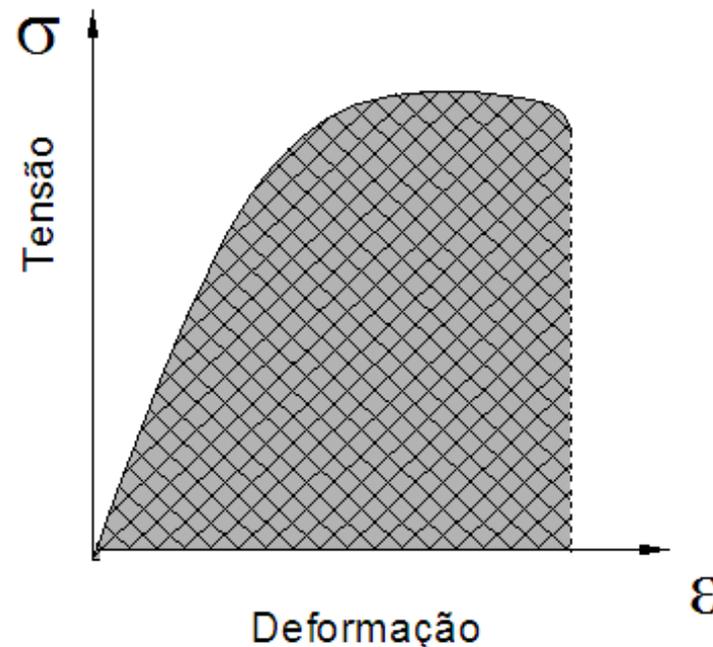
$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y$$

$$U_r = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$



Tenacidade

- ▶ A tenacidade geralmente representa a capacidade de um material em absorver energia até sua fratura
- ▶ A tenacidade depende fortemente da geometria do corpo e da forma (intensidade, direção, etc.) de como a carga é aplicada
- ▶ Sob o ponto de vista prático ela representa a área total sob a curva Tensão X Deformação até a ruptura



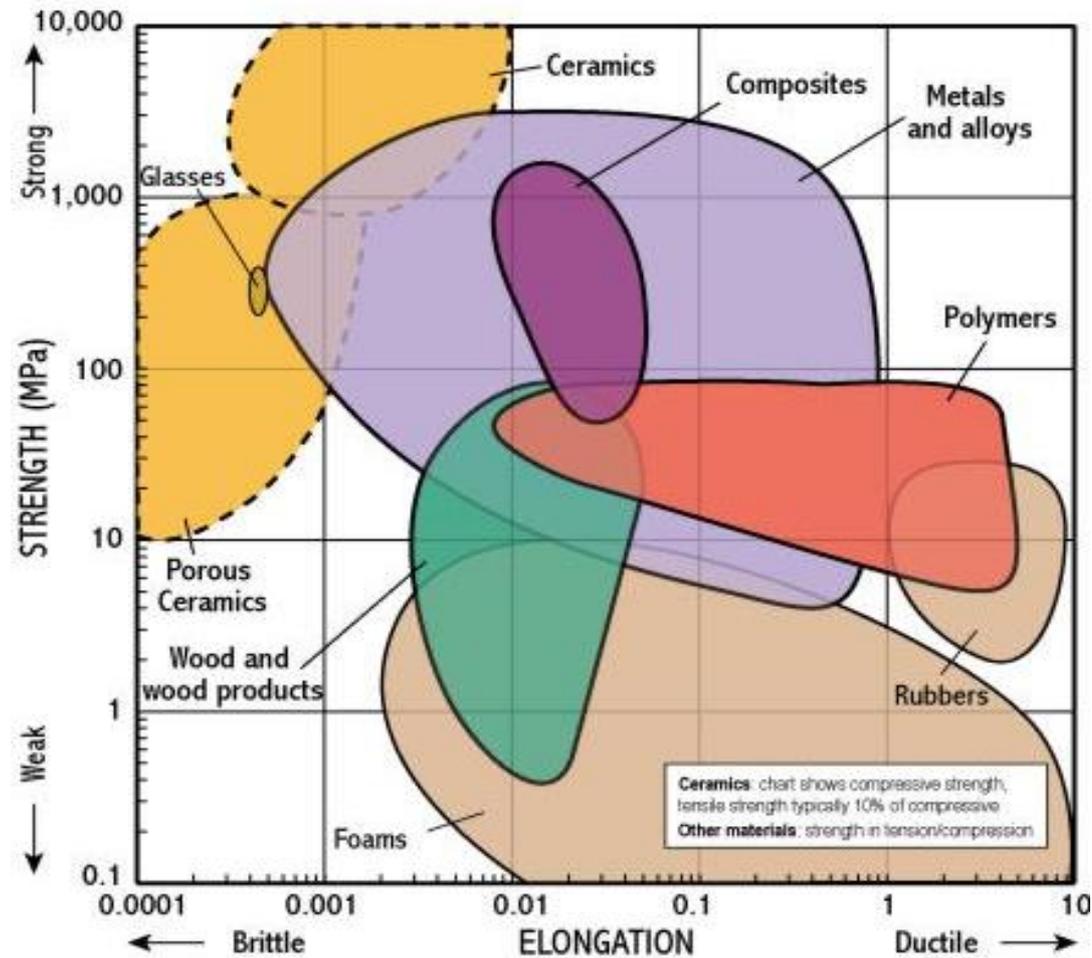


Deformação Plástica

- ▶ Suponha que uma tensão trativa seja aplicada ao corpo e então a retirada após o ponto de escoamento ser alcançado
- ▶ Nesse caso a deformação é irreversível e a remoção do carregamento leva o material a não retornar ao seu estado original

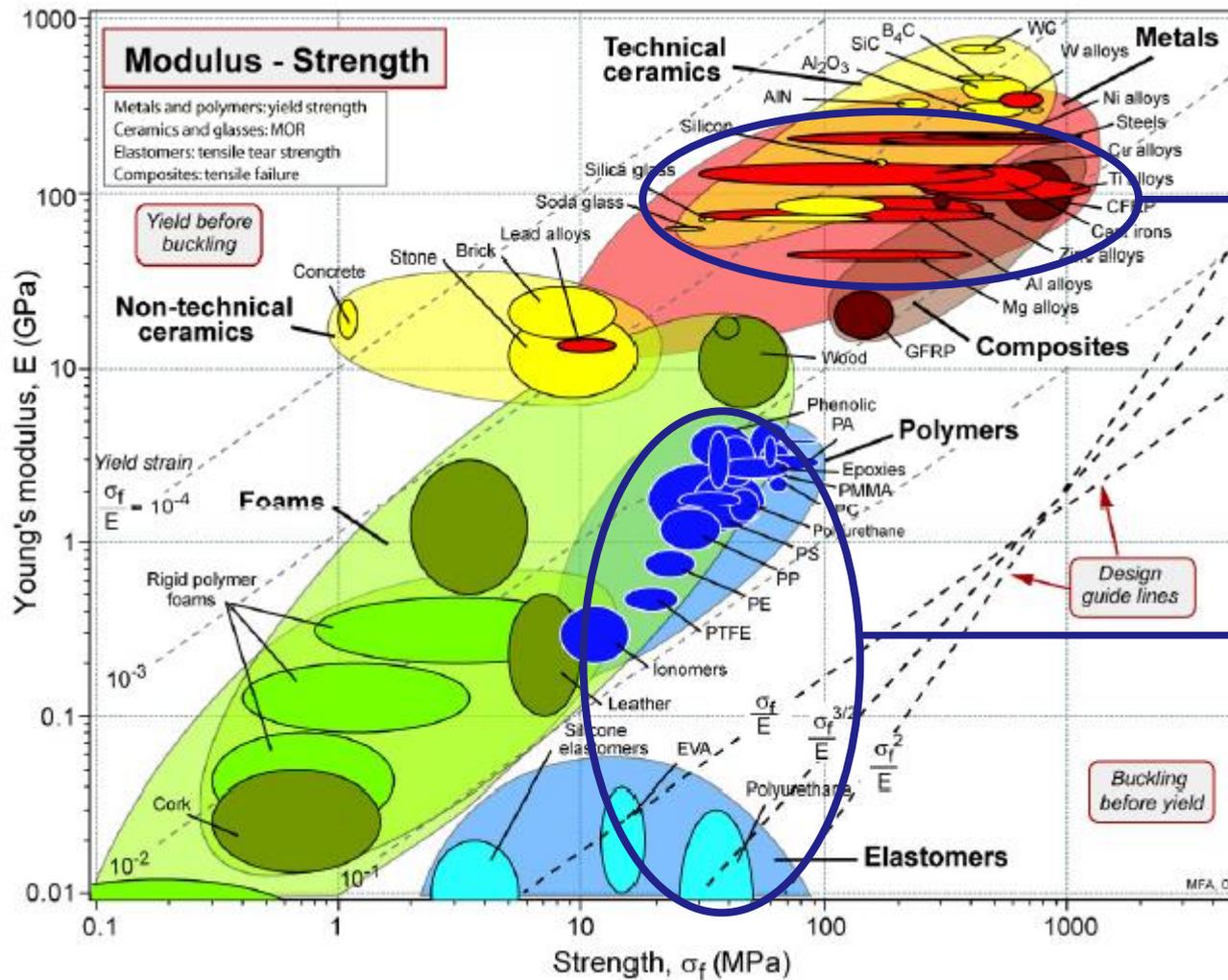


Comportamento dos materiais





Comportamento dos materiais

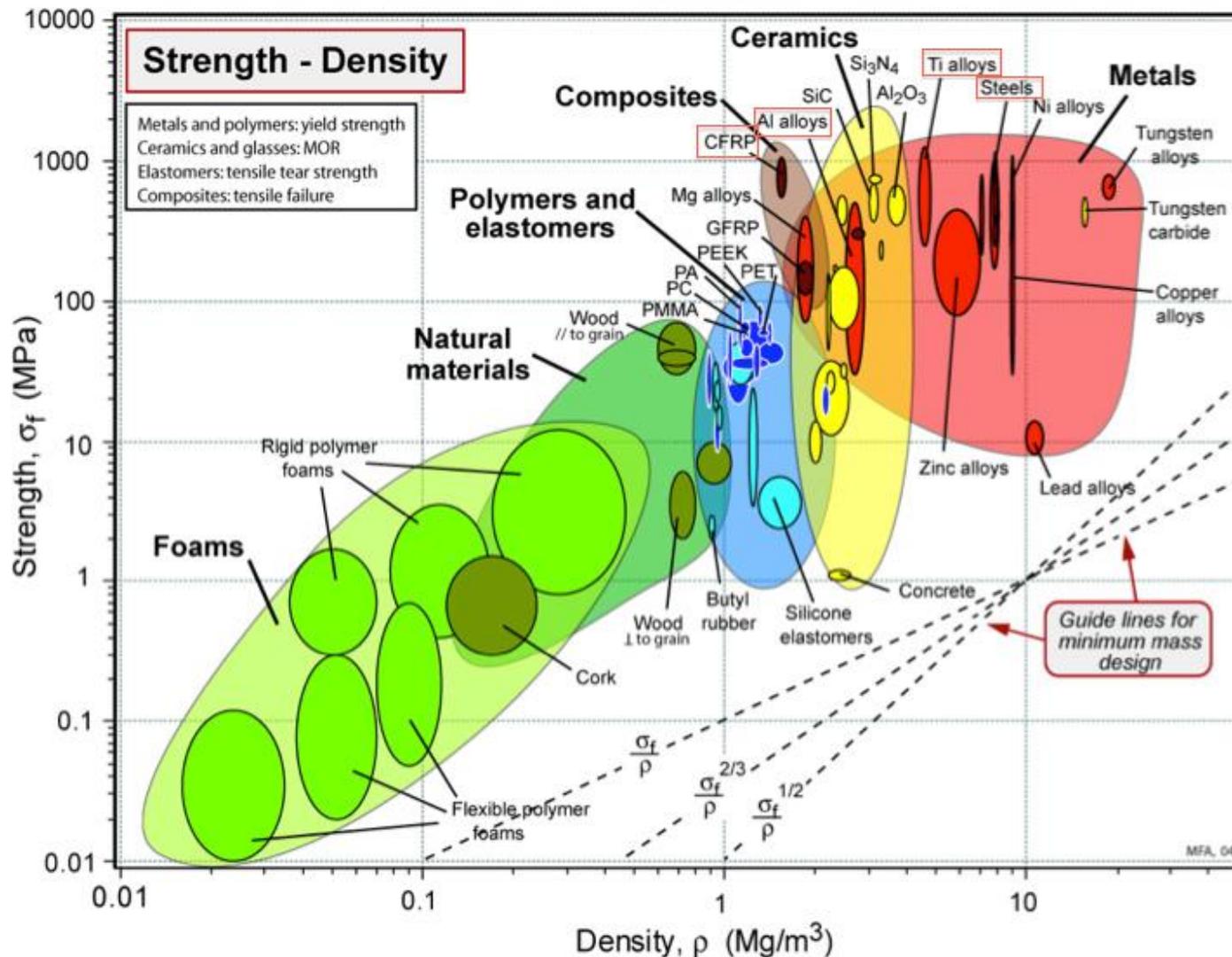


Metais: as "bolhas" alongadas representam a resistência sensível a microestrutura

Polímeros e elastômeros: E e σ_f apresentam "bolhas" alongadas similares a resistência sensível a microestrutura



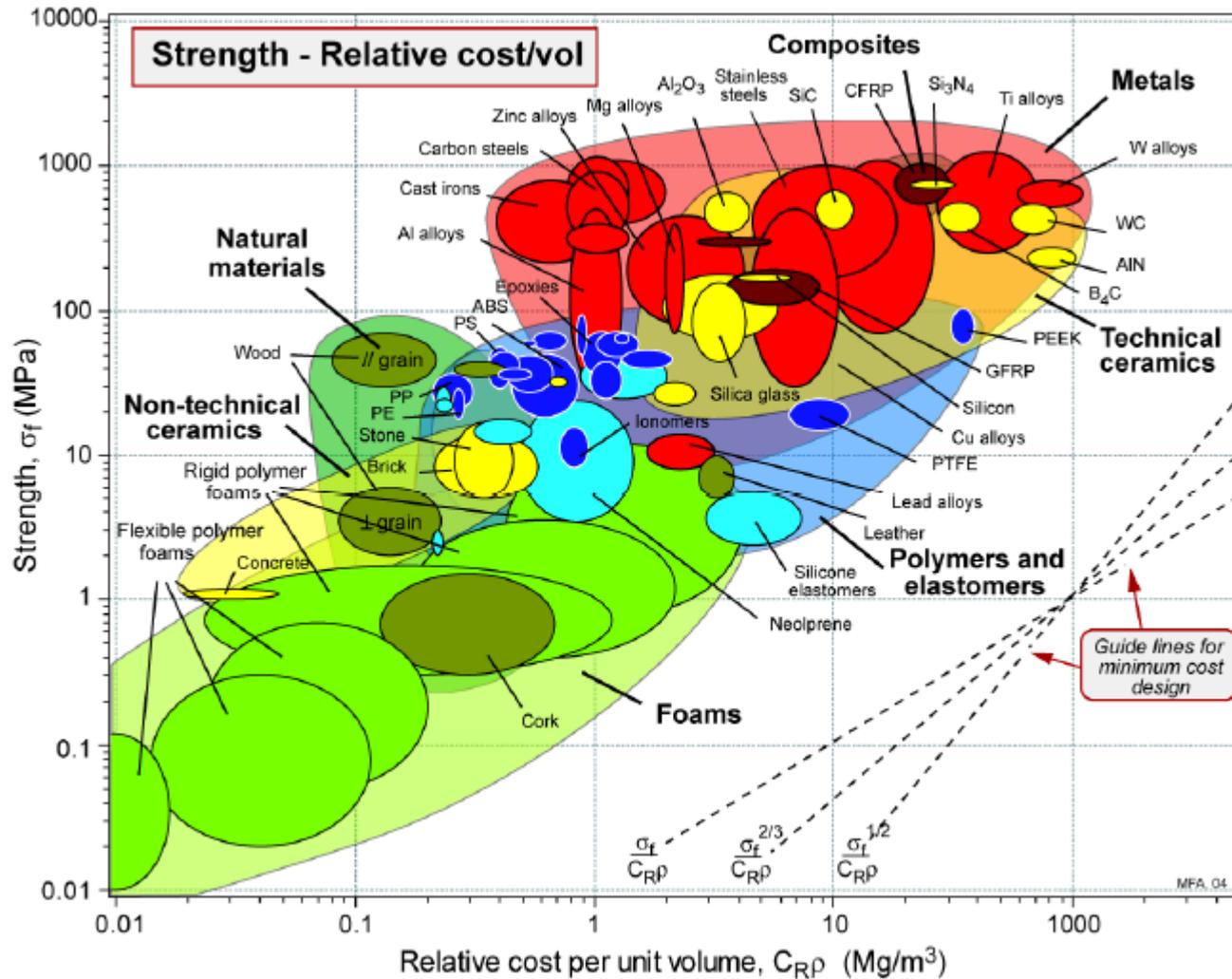
Comportamento dos materiais



Ashby, M.F.; Materials Selection in Mechanical Design, Fourth Edition, Elsevier Science 2010



Comportamento dos materiais





Vídeos sobre ensaio de Tração



<https://www.youtube.com/watch?v=HGwtRn4UQKA>

<https://www.youtube.com/watch?v=WDRT4ovHcaY>

<https://www.youtube.com/watch?v=kSbgHLXRMZ0>

<https://www.youtube.com/watch?v=67fSwIjYJ-E>

<https://www.youtube.com/watch?v=D8U4G5kcpcM&t=340s>



FIM DA AULA 03