

Física do Corpo Humano

Módulo: **Mecânica do Corpo Humano**

Docente: **Luís Cunha**

Physics of the Human Body, Herman, Irving P., Springer; 1st ed. 2007. Corr. 2nd printing 2008

Physics of the Human Body, Richard P. McCall Johns Hopkins University Press; 1 edition (April 2010)

Introdução à Biofísica, Lídia Salgueiro, J. Gomes Ferreira, Serviço de Educação da Fundação Calouste Gulbenkian (1991)

CALENDARIZAÇÃO DA UC – FÍSICA DO CORPO HUMANO

Mês / dia - hora	Terça 09-11	Quinta 17-19	
2021			
Outubro		7	Mecânica do Corpo Humano (L. Cunha)
	12	14	
	19	21	
	26 - Avaliação MCH	28	
Novembro	2	4	Som. Fala e audição (M. Almeida)
	9	11	
	16	18	
	23	25	
	30 - Avaliação SFA+ECTM		
Dezembro		2	Energia, calor e trabalho. Metabolismo (P. Coutinho)
	7	9	
	14	16	
2022			
Janeiro	4	6	Ótica e visão (S. Nascimento)
	11	13	
	18 - Avaliação FPC + QVIS		

Mecânica do Corpo Humano



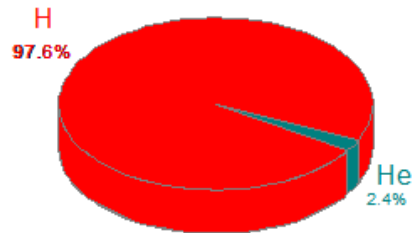
Programa

1. Propriedades Mecânicas
2. Estática do corpo humano
3. O movimento

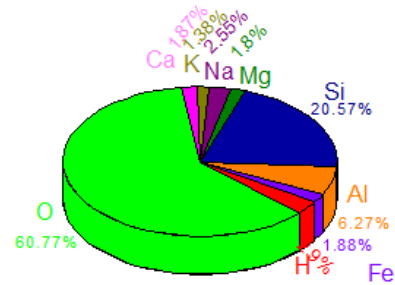
	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21
Média	15.2	12.3	10.5	12.2

Composição elementar

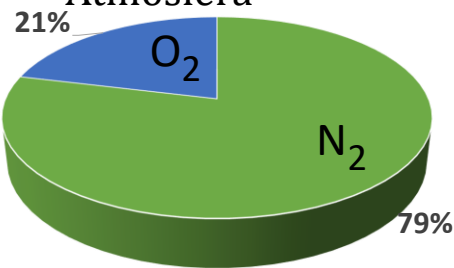
Universo



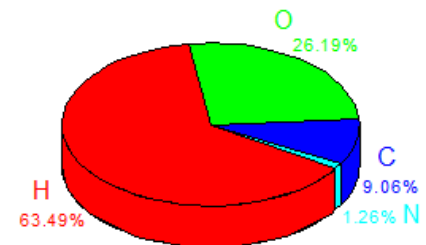
Crusta Terrestre



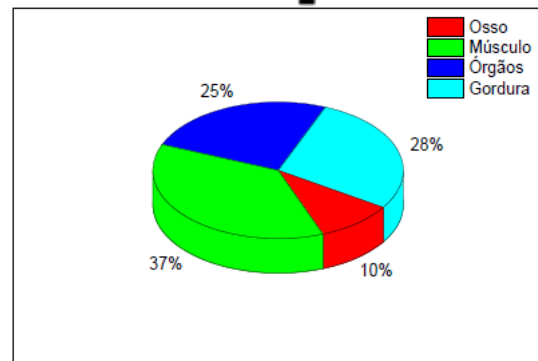
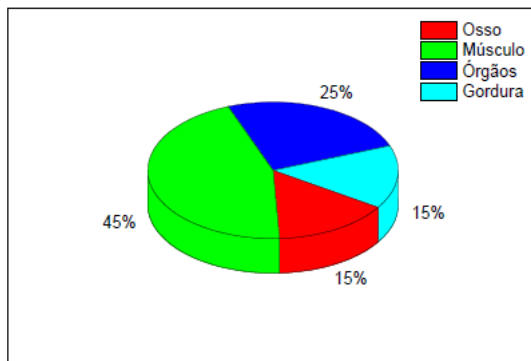
Atmosfera



Corpo Humano



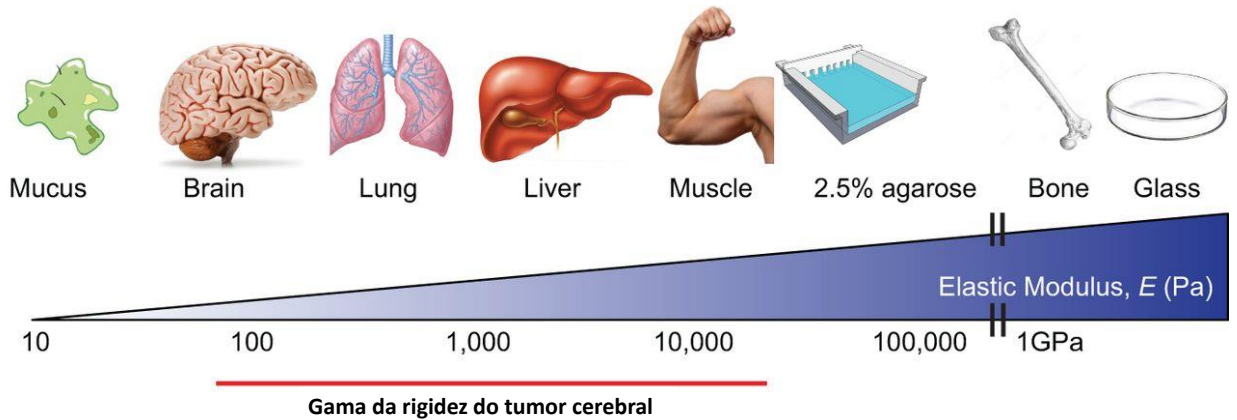
Percentagens mássicas



Denis Medeiros, Robert Wildman, *Advanced Human Nutrition*, Jones & Bartlett Publishers, 2012

1. Propriedades Mecânicas no corpo humano

Cap. 4 de Herman



Propriedades mecânicas em tecidos do corpo humano

Objetivo: Caracterizar o comportamento mecânico de tecidos do corpo humano, usando modelos que são usados em ciências e engenharia dos materiais.

Depois de ter o modelo, usa-se o modelo para entender as consequências dessas propriedades (e.g. para um determinado impacto, o osso parte? Que características deve ter o material de uma prótese?)

O corpo humano é bastante complexo. Todas as propriedades tem **origem biológica**, que por sua vez tem **origem química**, e se traduzem em **propriedades físicas**. Neste capítulo interessam-nos somente as propriedades mecânicas. O comportamento macroscópico é uma consequência da estrutura sub microscópica!

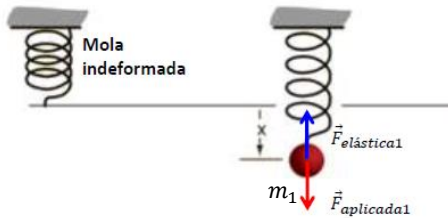
Grande parte dos resultados ou valores tabelados correspondem a uma média entre seres humanos. A distribuição varia com genes, género, idade, saúde, etc.

No corpo humano há **componentes passivos** (ossos e tendões), que só respondem a forças exteriores, e os **componentes ativos (músculos)**, que geram forças.

Mas nem é tudo preto e branco. Os músculos são elementos ativos e passivos também, porque respondem a estímulos.

Relembrar a lei de Hooke

Os elementos passivos reagem a forças aplicadas: Caso da mola elástica



$$F_{elástica} = -kx$$

$$m_2 = 2m_1$$

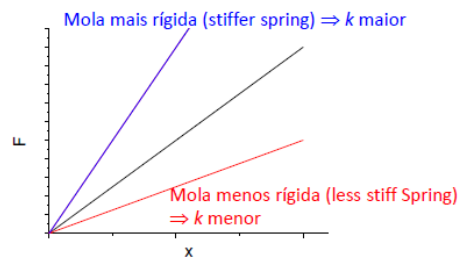
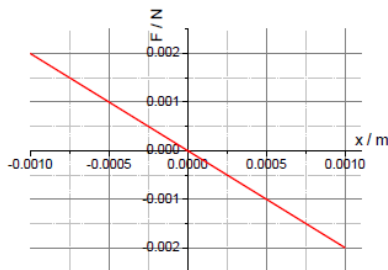
No regime elástico de uma mola, Se for aplicada uma força duas vezes maior, a mola elástica tem um alongamento duplo do primeiro.

A força que a mola exerce (força elástica) também duplica

$$\vec{F}_{aplicada2} = 2 \times \vec{F}_{aplicada1}$$



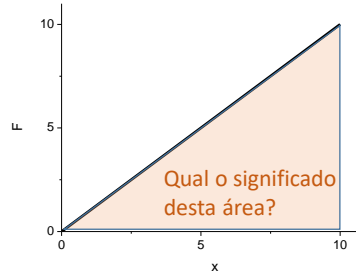
$$\vec{F}_{elástica2} = 2 \times \vec{F}_{elástica1}$$



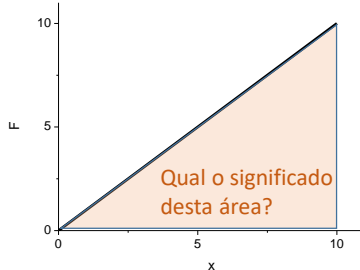
O declive dá o valor da constante elástica k : $k = \frac{\Delta F}{\Delta x}$

VoxVote 1

Que representa a área sombreada do gráfico $F(x)$, em que F representa a força elástica e x a elongação da mola?



- ☐ Força em função da elongação
- ☐ Elongação em função da força
- ☐ Energia elástica acumulada na mola
- ☐ Trabalho realizado pela força elástica



$$F_{\text{conservativa}} = -\frac{dU}{dx}$$

$$F_{\text{elástica}} = -kx$$

A energia acumulada na deformação da mola (energia potencial elástica) pode ser facilmente calculada:

$$F_{\text{elástica}} = -\frac{dU_{\text{elástica}}}{dx} \Rightarrow W = \int_{x_0}^x -kx dx$$

$$U_{\text{elástica}} = \frac{1}{2}kx^2$$

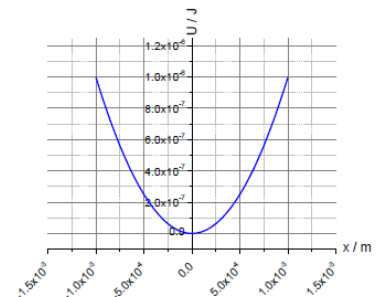
$$W = -k\left(\frac{x^2}{2} - \frac{x_0^2}{2}\right)$$

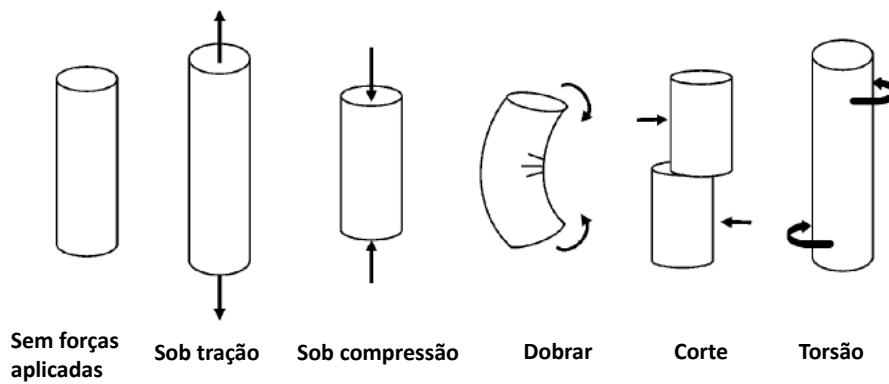
$$W = \frac{1}{2}kx_0^2 - \frac{1}{2}kx^2$$

A energia potencial armazenada nestes sistemas pode ser obtida de volta.

Os ossos e os tendões obedecem razoavelmente a este modelo (elástico).

A natureza elástica dos tendões é importantes para armazenar e devolver essa energia durante o movimento.



Forças aplicadas em sólidos deformáveis

<https://www.youtube.com/watch?v=DLE-ieOVfjI>

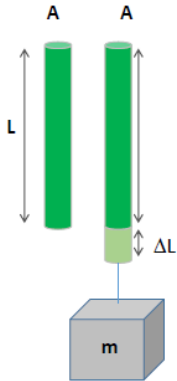
Colocar um corpo sob tração (ou compressão)

As respostas elástica dos elementos passivos nem sempre é simples como no caso da mola. *E.g.* molas diferentes de um mesmo material podem ter constantes elásticas diferente (mais espessa/mais fina, mais comprida/mais curta, geometria diferente); e há elementos passivos que podem responder à forças dependentemente do tempo, ou seja, podem responder às forças aplicadas no momento, mas também podem responder condicionadas a forças aplicadas anteriormente.

Imagine-se uma experiência:

usam-se fios de cobre nos quais se aplicam forças tracção de magnitude conhecida e mede-se as alterações de comprimento provocadas.

Registo de observações:



L (m)	A (m ²)	m (kg)	F (N)	ΔL (m)
1	10 ⁻⁶	0	0	0
1	10 ⁻⁶	5	49	5 × 10 ⁻⁴
1	10 ⁻⁶	10	98	10 ⁻³
0.1	10 ⁻⁶	0	0	0
0.1	10 ⁻⁶	10	98	10 ⁻⁴
1	10 ⁻⁵	0	0	0
1	10 ⁻⁵	10	98	10 ⁻⁴
2	10 ⁻⁶	10	98	2 × 10 ⁻³
1	5 × 10 ⁻⁶	10	98	2 × 10 ⁻⁴

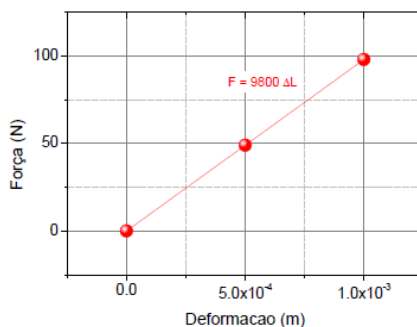
Características dos fios

Observação: Nos casos em que a experiência foi realizada, quando se remove a massa o fio retoma o comprimento original =

DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

Mantendo constante: L A

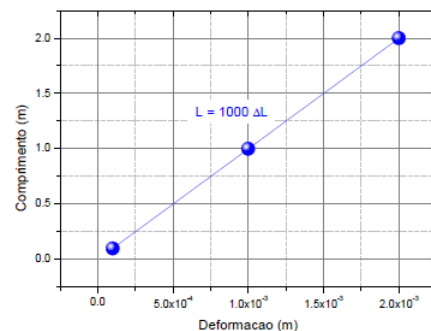
Variando F e medindo a deformação ΔL



$$\Delta L \propto F$$

Mantendo constante: F A

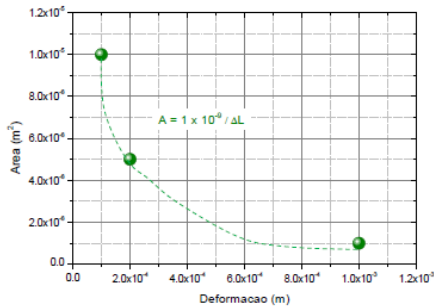
Variando L e medindo a deformação ΔL



$$\Delta L \propto L$$

Mantendo constante: F L

Variando A e medindo a deformação ΔL



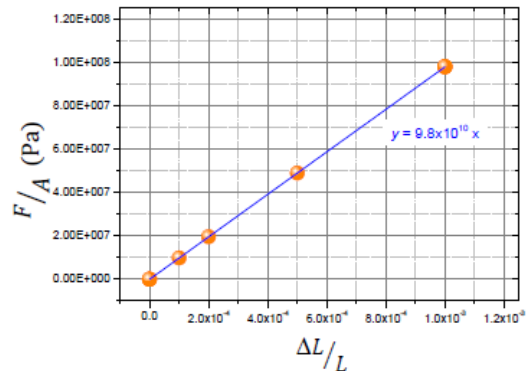
Resultado do estudo controlando as variáveis:

$$\Delta L \propto \frac{LF}{A} \Rightarrow \frac{F}{A} \propto \frac{\Delta L}{L}$$

$$\Delta L \propto \frac{1}{A}$$

$$\frac{F}{A} \propto \frac{\Delta L}{L}$$

F (N)	A (m²)	ΔL (m)	L (m)	F/A (N/m²)	ΔL/L
0	10 ⁻⁶	0	1	0	0
49	10 ⁻⁶	5 × 10 ⁻⁴	1	49 × 10 ⁶	5 × 10 ⁻⁴
98	10 ⁻⁶	10 ⁻³	1	98 × 10 ⁶	10 ⁻³
0	10 ⁻⁶	0	0.1	0	0
98	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	0.1	98 × 10 ⁶	10 ⁻³
0	10 ⁻⁵	0	1	0	0
98	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	1	98 × 10 ⁵	10 ⁻⁴
98	10 ⁻⁶	2 × 10 ⁻³	2	98 × 10 ⁶	10 ⁻³
98	5 × 10 ⁻⁶	2 × 10 ⁻⁴	1	196 × 10 ⁵	2 × 10 ⁻⁴



Tensão aplicada (Stress) $\left(\frac{F}{A}\right) = E \left(\frac{\Delta L}{L}\right)$ Deformação relativa (Strain)

Módulo de Young (módulo de elasticidade) de um material

$$\sigma = E \epsilon$$

O **Módulo de Young (E)** é uma propriedade intensiva dum material e é uma medida da resistência à deformação elástica de um material.

A constante elástica é uma propriedade extensiva (depende de massa, volume,...)

Unidades SI?

VoxVote 2

Quais as unidades do Módulo de Young (E) no S. I.?

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L}$$

$$\sigma = E \epsilon$$

☐ N

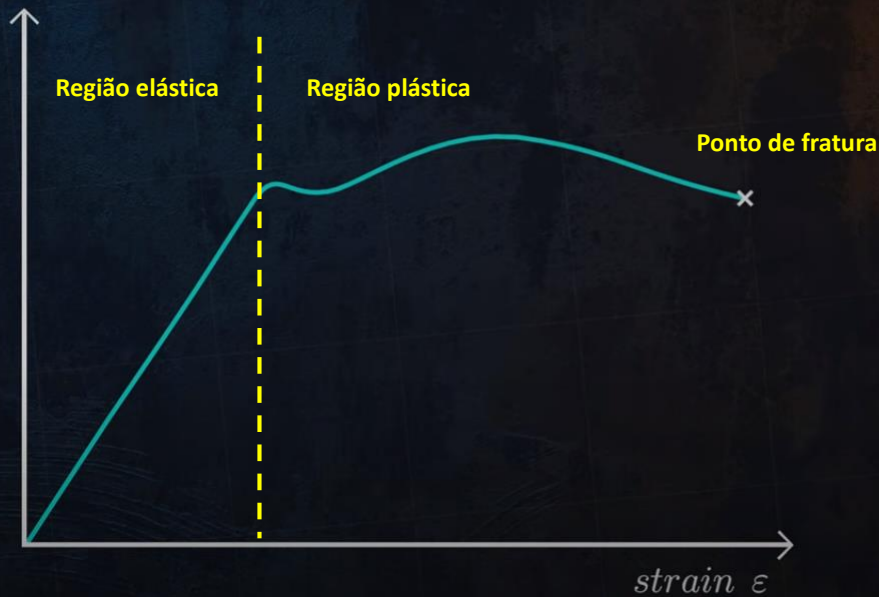
☐ N/m

☐ N.m = J

☐ N/m² = Pa

Understanding Young's Modulus

stress σ



Understanding Young's Modulus

stress σ Região
elástica

$$\sigma = E\varepsilon$$

Região plástica

strain ε

Cada material tem a sua curva tensão/deformação, mas as famílias de materiais têm comportamentos típicos:

Material frágil – deformam pouco quando sujeitos a tensões relativamente elevadas. A fratura dos materiais frágeis é repentina, praticamente sem deformação plástica (vidro, cerâmicos, diamante, ...)

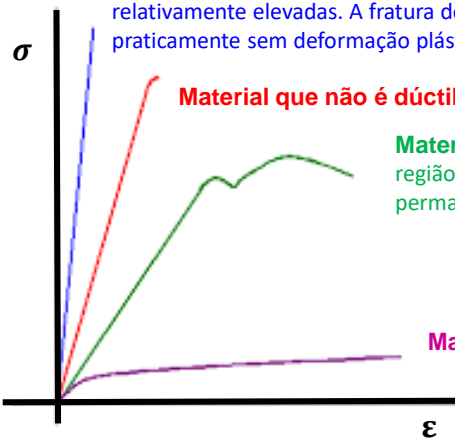


Material que não é dúctil – deformam pouco e a rotura acontece repentinamente (fios de aço)

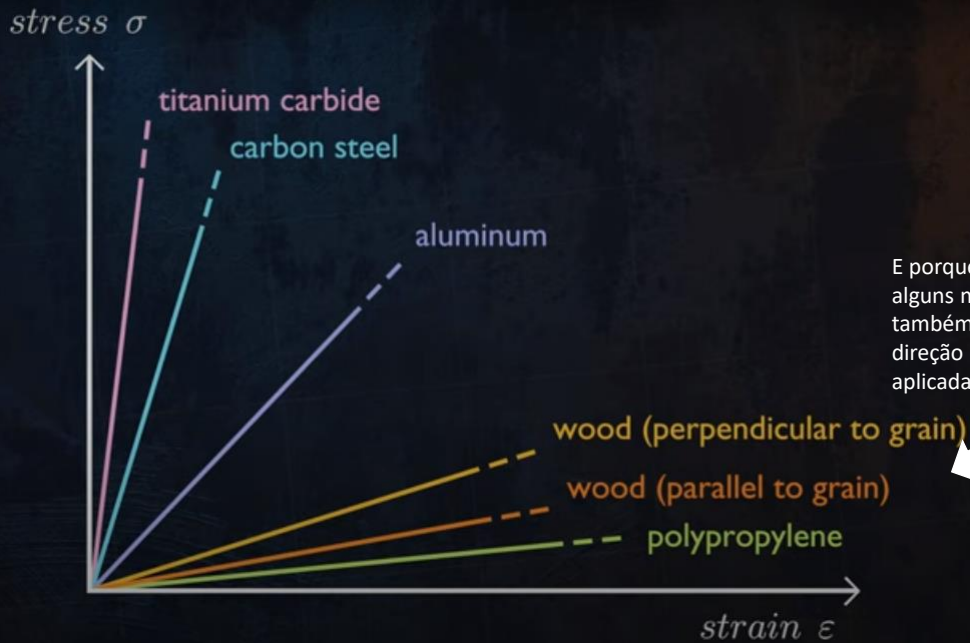
Material dúctil – acima da região elástica há uma região em que ocorre “necking”. A deformação permanente ocorre nesta região plástica (metais, ...)



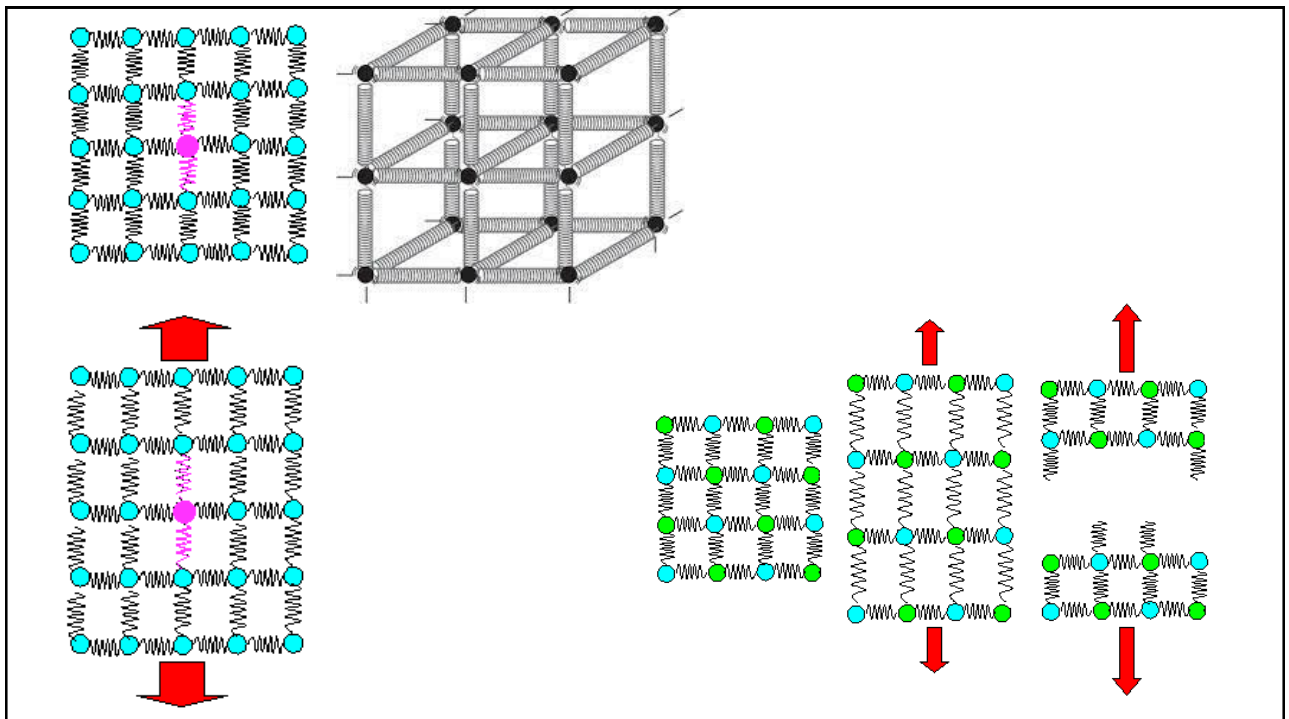
Material plástico – pequena região elástica (plasticina)



Porque é que diferentes materiais têm diferentes módulos de Young (ou de elasticidade)?



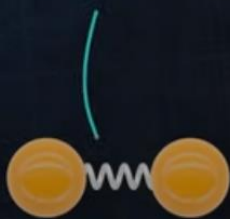
E porque é que em alguns materiais também depende da direção onde é aplicada a tensão?



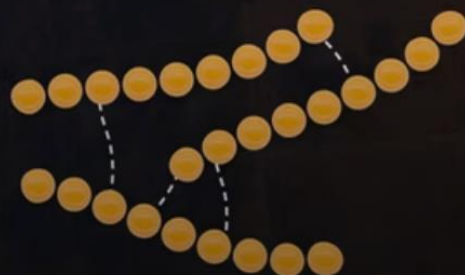
e.g. Metais, sólidos covalentes (diamante)
iônicos (NaCl)

e.g. polímeros

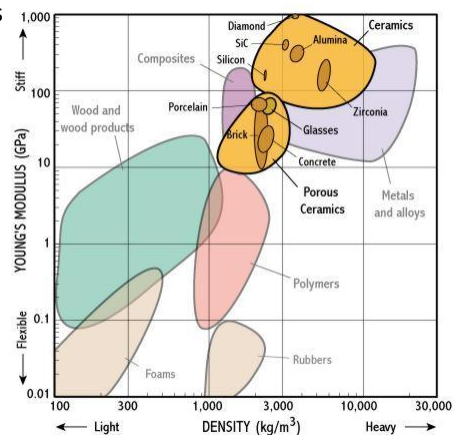
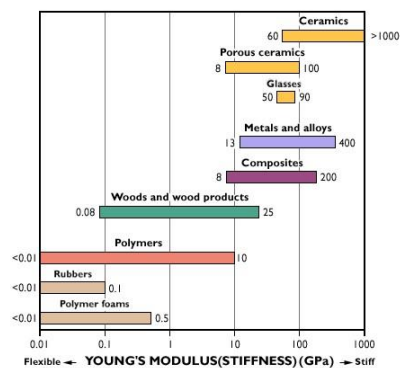
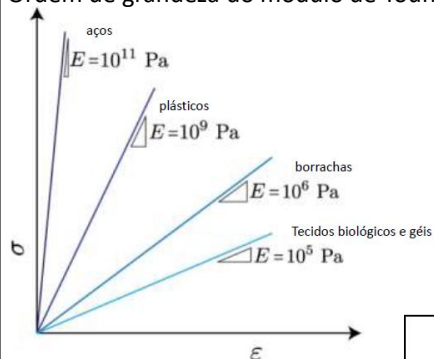
Ligações interatômicas
(FORTES)



Ligações intermoleculares
(FRACAS)



Ordem de grandeza do módulo de Young de alguma famílias de materiais



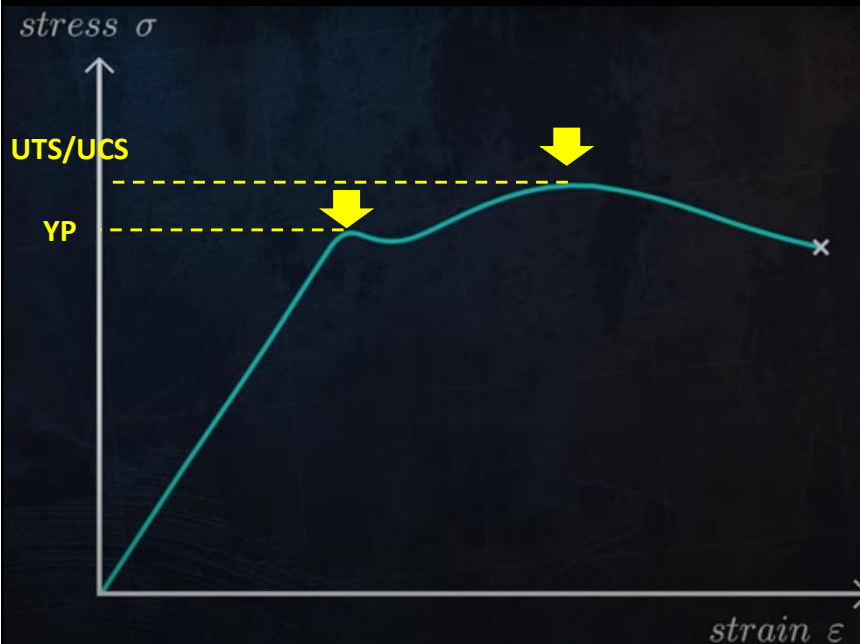
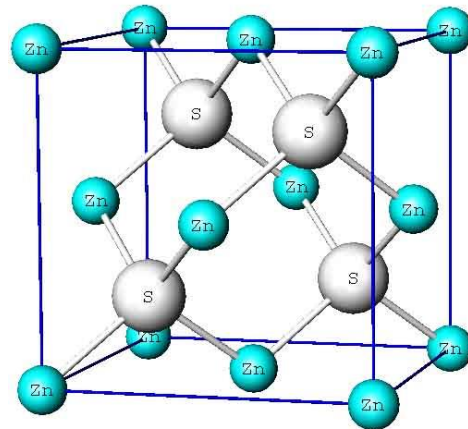
$$\sigma = E\varepsilon$$



Esta relação só é válida na **região elástica** (pequenas deformações $\Rightarrow \varepsilon \ll 1$)

Para maiores deformações o material sofre deformações permanentes (plásticas) e/ou fratura (dependendo do material e da dimensão da deformação)

Se os materiais forem homogêneos e isotrópicos, o módulo de Young é o mesmo em qualquer direção. Para materiais anisotrópicos (por exemplo nos cristais), o módulo de Young varia com a direção.



YP (*yield point* – ponto de cedência) corresponde a uma tensão superior ao limite elástico (YS - Yield Stress). Acima deste valor a elongação aumenta muito para pouco aumento de tensão. Estima-se como a interseção da curva de tensão deformação com uma linha paralela à região linear interceptando o eixo da deformação a 0.002.

UTS (*ultimate tensile strength* – Tensão máxima de tração) corresponde à maior tensão de tração que o material pode suportar antes de partir. Quanto maior, maior é a resistência do material à fratura. Existe o equivalente para a compressão (UCS - *ultimate compressive strength*).

Famílias de tecidos do corpo humano

Epitelial – Cobre o corpo, órgãos... (avascular).

Conectivo – ossos, cartilagem, ligamentos e tendões, gordura, ... (os ossos têm vasos sanguíneos, mas cartilagem, ligamento e tendões, não).

Nervoso

Muscular – Podem-se contrair, distender e retomar tamanho original

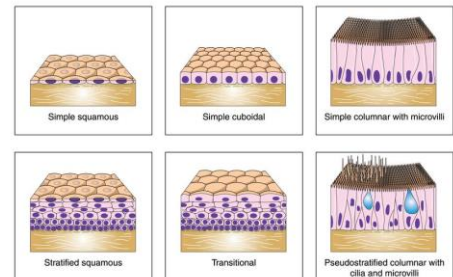
Estriado esquelético

Liso

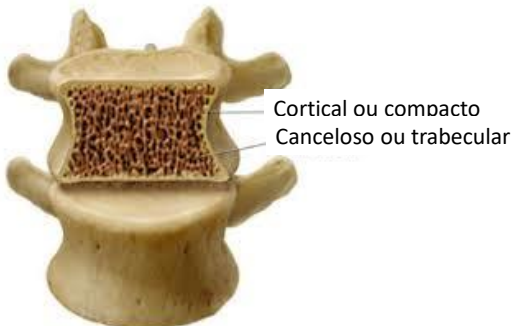
Estriado Cardíaco



Tecido Epitelial – Cobre o corpo, órgãos... (avascular).



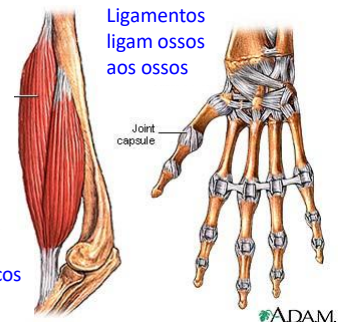
Tecido conectivo – ossos, cartilagem, ligamentos e tendões, gordura, ... (os ossos têm vasos sanguíneos, mas cartilagem, ligamento e tendões, não).



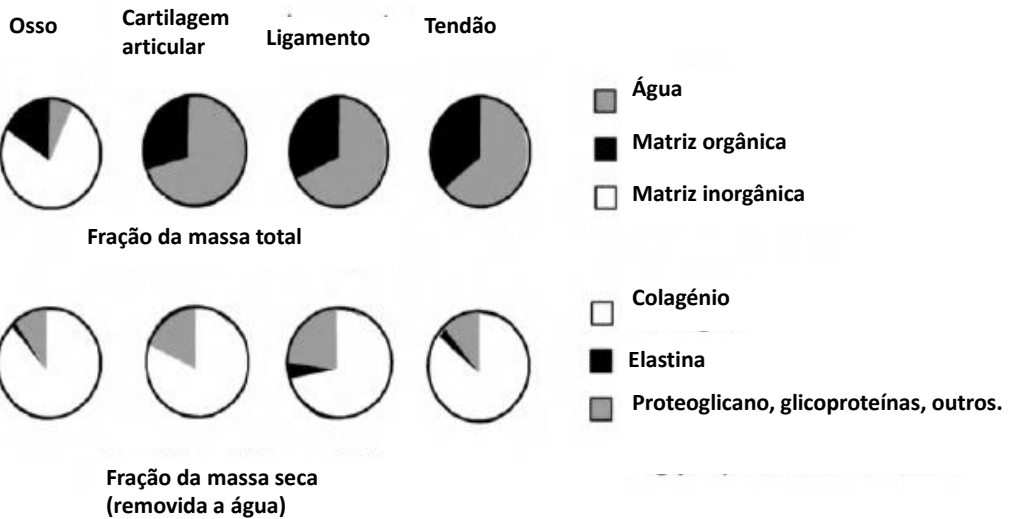
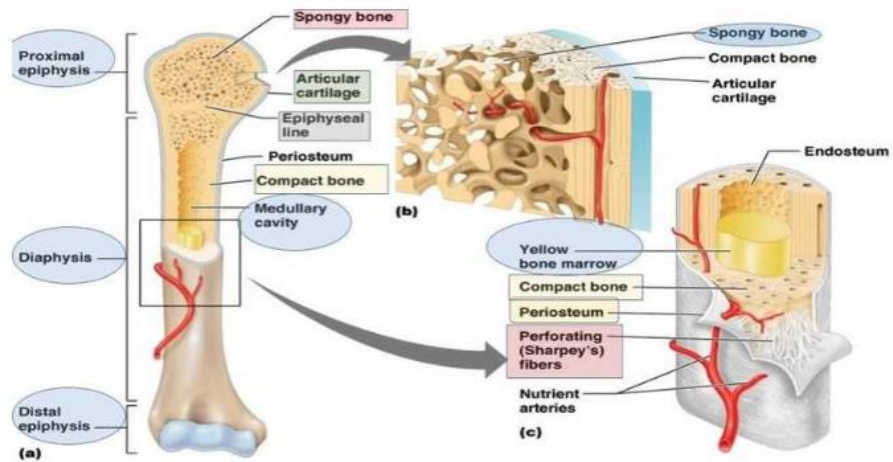
Músculo esquelético

Tendões ligam
músculos esqueléticos
aos ossos

Ligamentos
ligam ossos
aos ossos



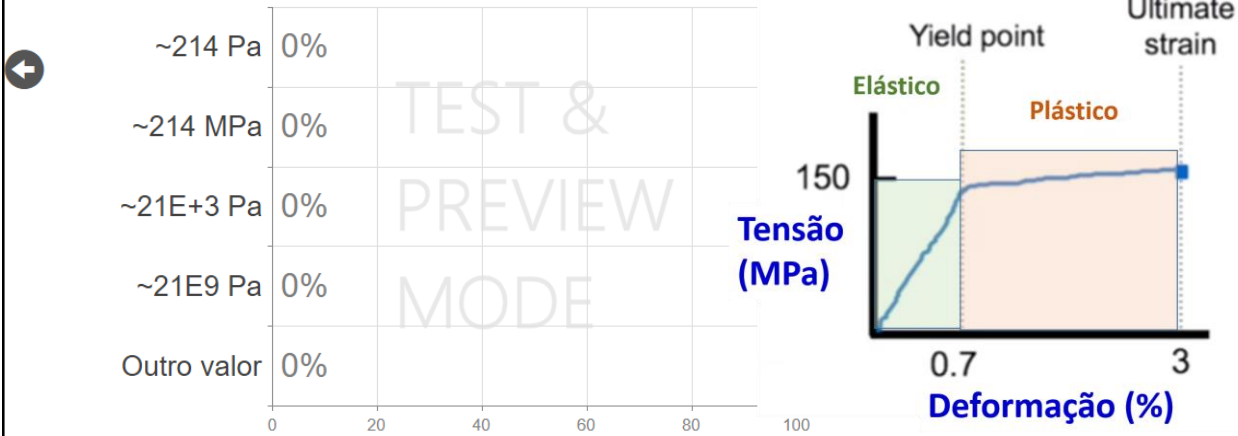
Irrigação sanguínea em ossos típicos



VoxVote 3

3. Faça uma estimativa do módulo de Young do osso compacto

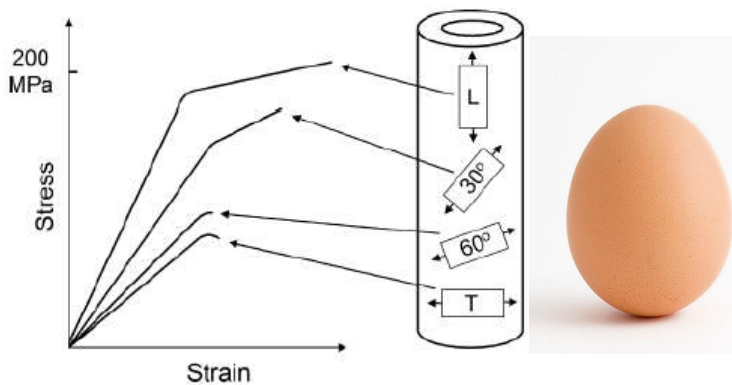
Curva tensão deformação para osso compacto



VOXvote
Create your own for free

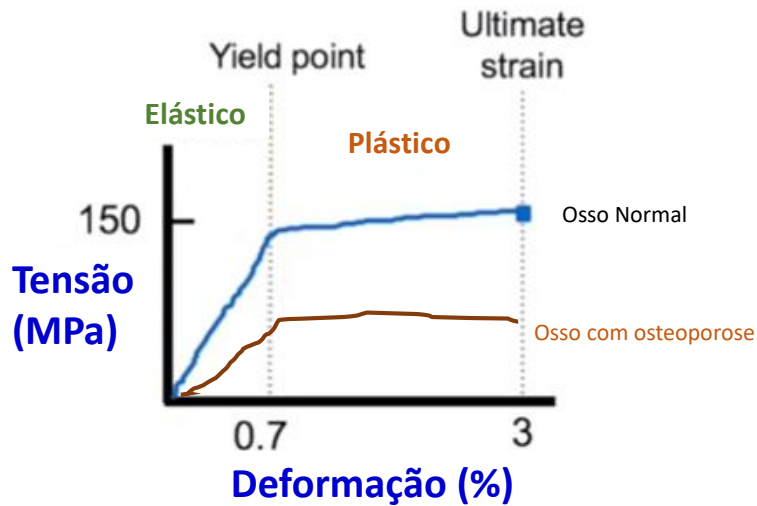
Vote on live.voxvote.com PIN: 64636

Anisotropia



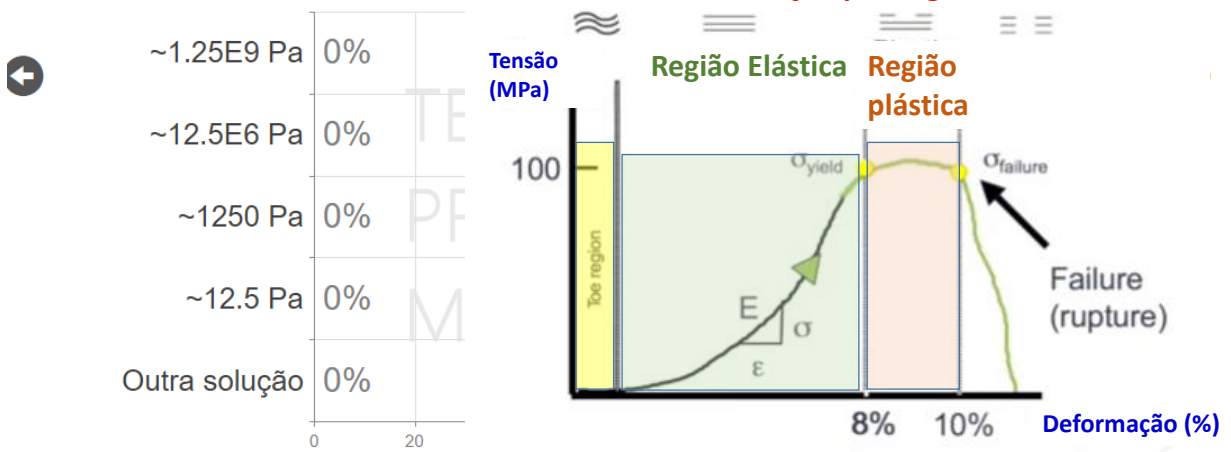
Exemplo para osso cortical

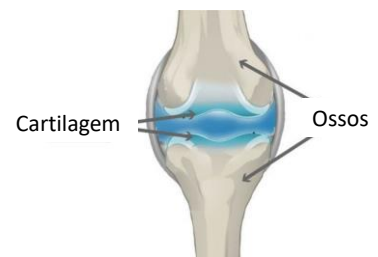
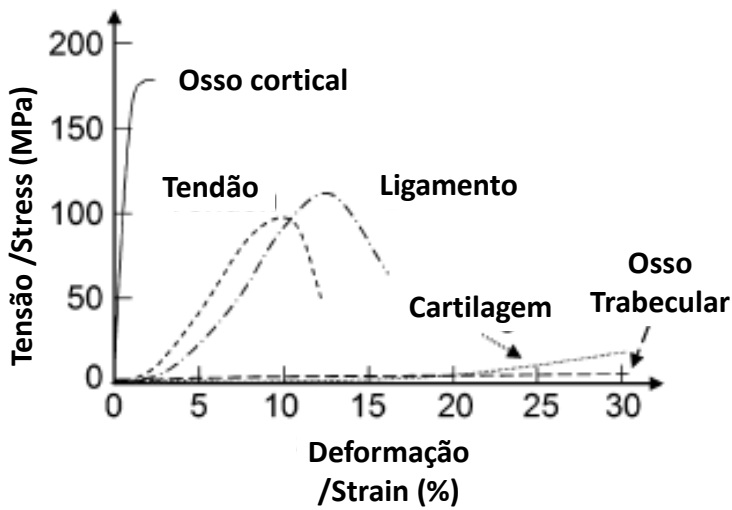
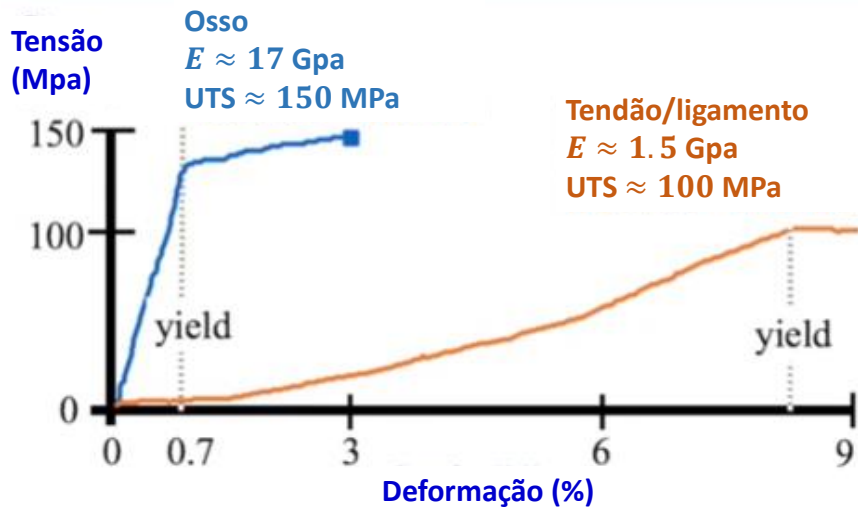


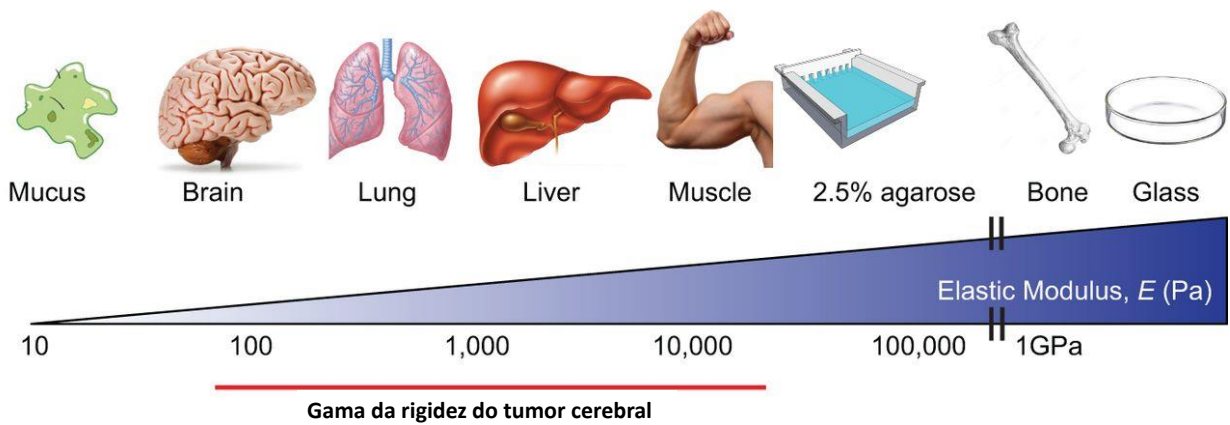
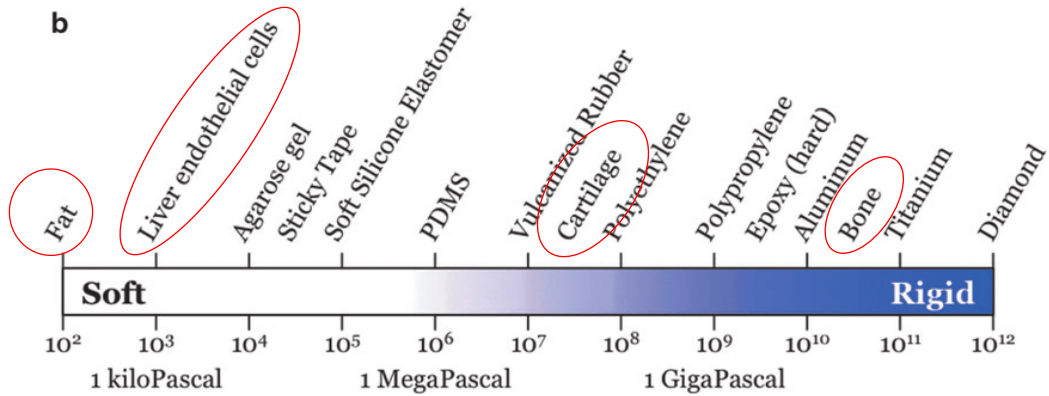
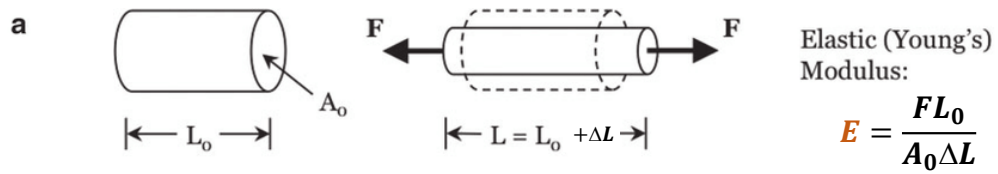


4. Faça uma estimativa do módulo de Young dos ligamentos e tendões

Curva tensão deformação para ligamentos e tendões

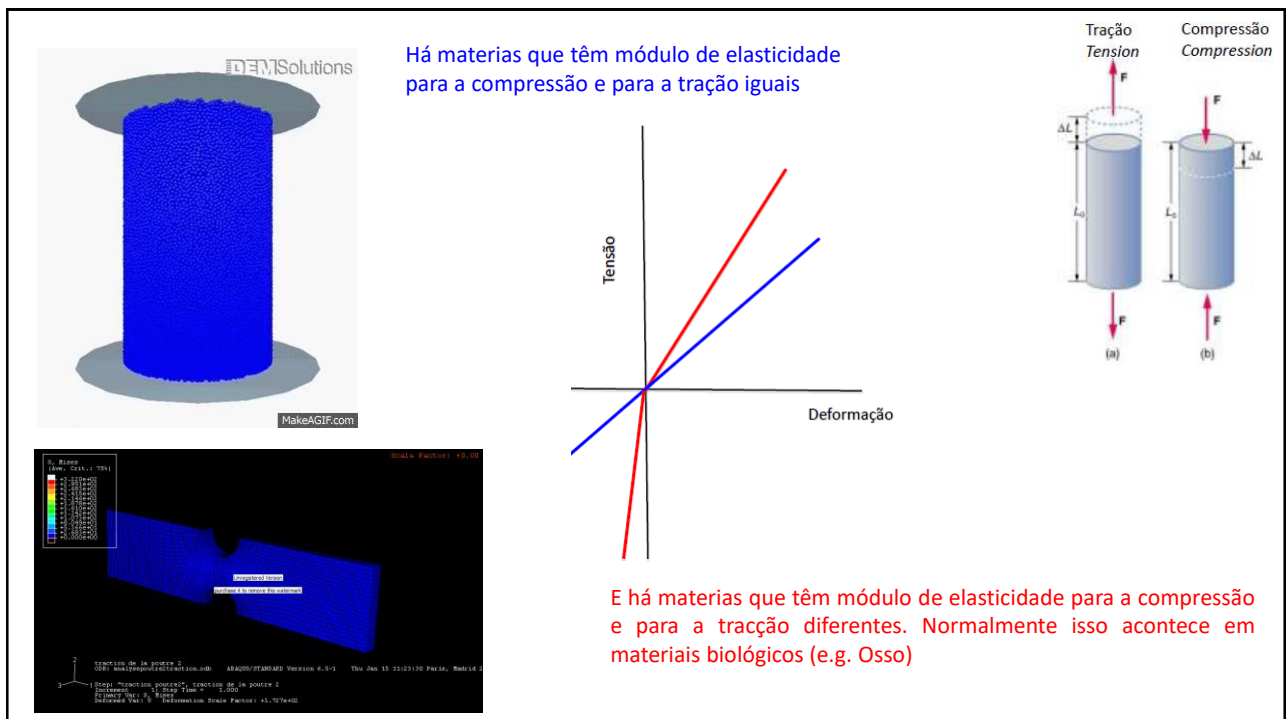






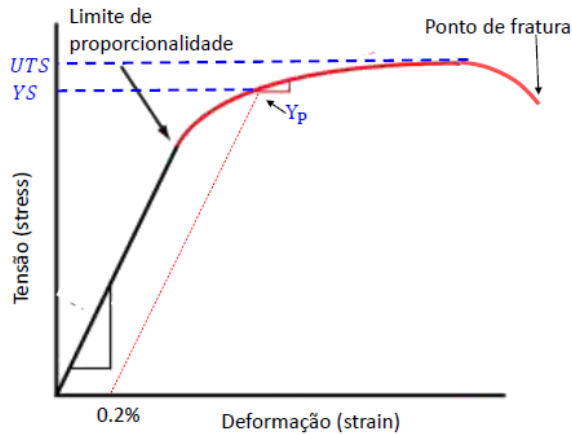
organ	ultimate percent elongation			material	Y ($\times 10^3$ MPa = GPa)	UCS (MPa)	UTS (MPa)
	UTS (MPa)	UPE (%)	Y (MPa)				
hair (head)	197	40	12,000	hard steel	207	552	827
dentin (wet teeth) (compression)	162	4.2	6,000	rubber	0.0010	—	2.1
femoral compact bone (compression)	162	1.8	10,600	nylon 66	1.2–2.9	—	59–83
femoral compact bone	109	1.4	10,600	gold	78	—	—
tendons (calcaneal =Achilles)	54	9.0	250	tungsten	411	—	—
nail	18	14	160	granite	51.7	145	4.8
nerves	13	18	10	concrete	16.5	21	2.1
intervertebral disc (compression)	11	32	6.0	oak	10.0	59	117
skin (face)	3.8	58	0.3	fused quartz	73	—	69
vertebrae	3.5	0.8	410	diamond	965	—	—
elastic cartilage (external ear)	3.1	26	4.5	porcelain	—	552	55
hyaline cartilage (synovial joints)	2.9	18	24	alumina (85% dense)	220	1,620	125
intervertebral disc	2.8	57	2.0	alumina (99.8% dense)	385	2,760	205
cardiac valves	2.5	15	1.0	compact bone	17.9	170	120
ligaments (cattle)	2.1	130	0.5	trabecular bone	0.076	2.2	—
gall bladder (rabbit)	2.1	53	0.05				
umbilical cord	1.5	59	0.7				
vena cava (longitudinal direction)	1.5	100	0.04				
wet spongy bone (vertebrae)	1.2	0.6	200				
coronary arteries	1.1	64	0.1				
large intestine (longitudinal direction)	0.69	117	0.02				
esophagus (longitudinal direction)	0.60	73	0.03				
stomach (longitudinal direction)	0.56	93	0.015				
small intestine (longitudinal direction)	0.56	43	0.2				
skeletal muscle (rectus abdominis)	0.11	61	0.02				
cardiac muscle	0.11	64	0.08				
liver (rabbit)	0.024	46	0.02				

Estes valores são os valores típicos na direção preferencial de funcionamento (normalmente longitudinal).



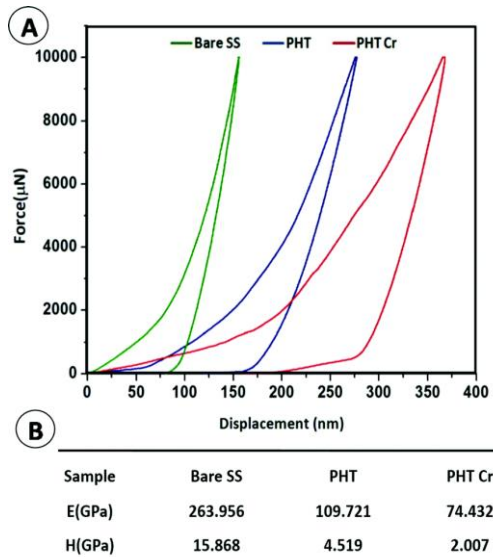
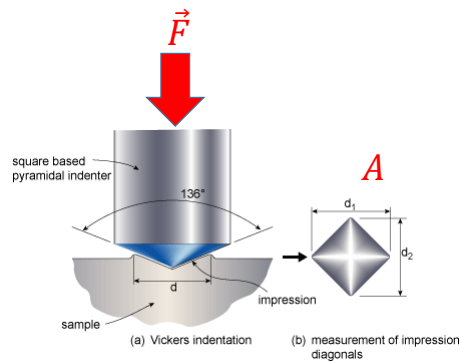
O **módulo de Young** é uma medida da rigidez de um material. Para deformar um material mais rígido é necessário aplicar uma tensão maior.

Não confundir **Rigidez** com **Resistência mecânica** (Tensão máxima, Tensão de Ruptura, Limite de Proporcionalidade, etc. – unidades SI: N m^{-2}).



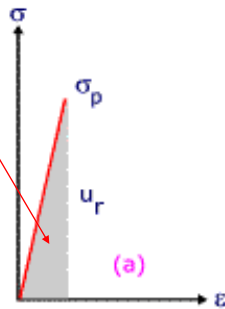
Não confundir **Rigidez** com **Dureza (H)** (Resistência à deformação plástica localizada induzida por indentação mecânica – unidades SI: N m^{-2}).

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



Não confundir **Rigidez** com **Tenacidade** ou **resiliência** (Medida da capacidade para absorver energia)

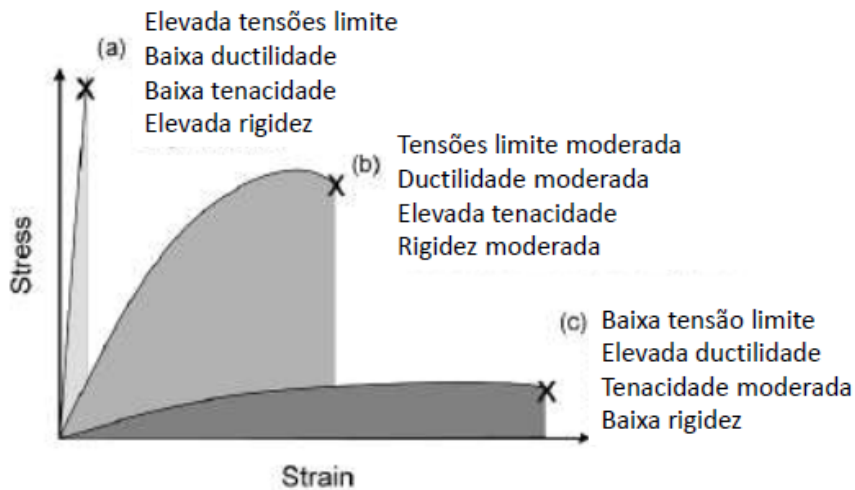
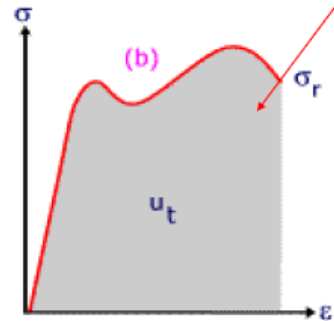
Resiliência: mede a capacidade de um material absorver energia em regime elástico, i. e. sem que ocorra deformação plástica.



Unidades SI de Resiliência e tenacidade?

$$\text{N m}^{-2} \Leftrightarrow \text{J m}^{-3}$$

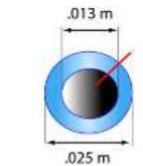
Tenacidade: mede a capacidade de um material absorver energia antes da ruptura.



Checkpoint

Quanto é que o fémur encurta se estiver apoiado num só pé?

Qual a energia elástica acumulada no fémur devido a este encurtamento?



$$\begin{aligned}L_0 &= 0.5 \text{ m} \\ m &= 70 \text{ kg} \\ Y &= 17.9 \text{ GPa}\end{aligned}$$

Admitindo um comportamento linear, qual a deformação máxima que o fémur pode suportar, sob compressão, antes de quebrar?

A deformação máxima que o fémur pode suportar, sob tração é igual, maior ou menor que no caso da compressão?