



Propietats dels materials biològics

1. Introducció

Els materials els poden trobar en diferents estats: sòlids, fluids (líquids i gasos) i plasmes (gas amb un alt grau de ionització). Aquesta és una classificació molt simple, realment no es senzill definir les fronteres entre els diferents estats de la matèria.

També els podem classificar en funció del seu origen (figura 1).

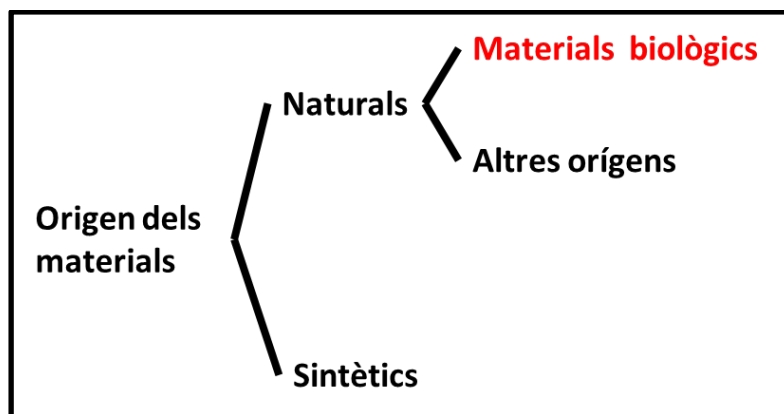


Figura 1. Classificació dels materials en funció del seu origen

Molts materials del nostre entorn són d'origen biològic, són els **materials biològics**, altres materials naturals són d'origen geològic i fins i tot còsmic.

També molts materials importants per nosaltres són sintètics, com els metalls, els ciments,... Dins dels materials sintètics trobem els **biomaterials** i els **materials bioinspirats** o **biomimètics**. Els biomaterials són materials sintètics (metalls, fibres,...) compatibles amb els sistemes biològics, aptes per aplicacions biomèdiques (pròtesis, dents postisses,...). Els biomaterials poden tenir components que són materials biològics. Els materials bioinspirats o biomimètics són materials sintètics que pretenen reproduir solucions tecnològiques dels materials biològics, en comentarem alguns exemples.

Els materials biològics són materials compostos, principalment constituïts per proteïnes, aigua, i minerals. Les seves propietats queden definides per la seva composició i estructura.

Taula 1. Principals components dels materials biològics (Meyers et al., 2011)

Components soft: macromolècules	Components Hard: minerals
Col·lagen (tipus I, II,...,XXVIII)	Carbonat de calci (CaCO_3)
Queratina	Fosfat de calci (hidroxiapatita: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)
Quinina	Sílice (SiO_2)
Elastina	Magnetita (Fe_3O_4)
Cel·lulosa	Òxid de coure
Resilina i abductina	

L'objectiu d'aquest tema és aproximar-nos a la comprensió dels fonaments físics de les principals propietats dels materials biològics. En particular centrarem el nostre interès en les propietats mecàniques dels materials biològics.

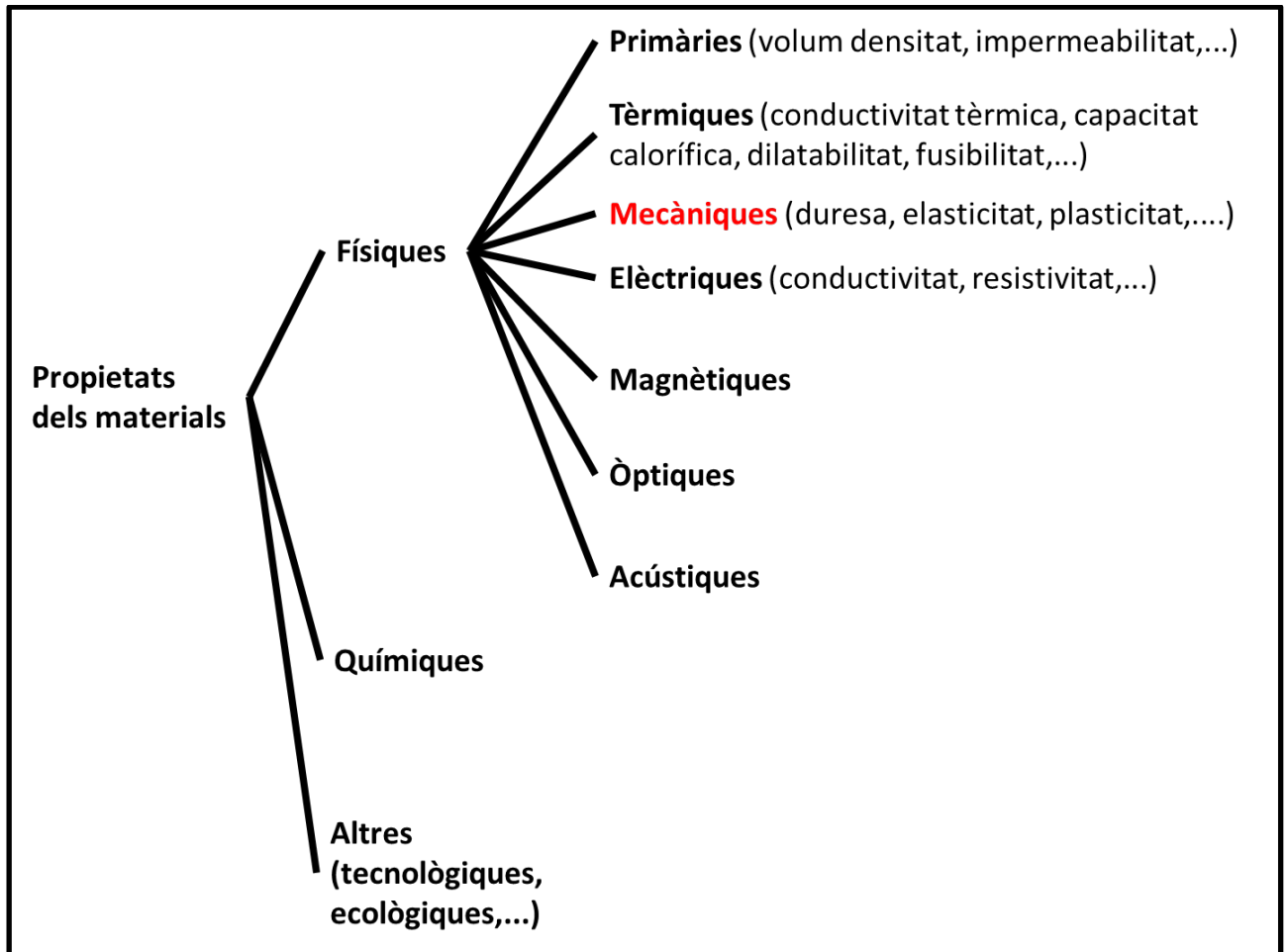
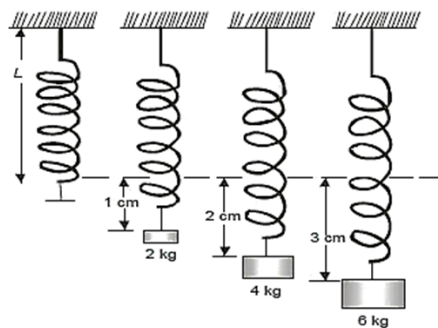


Figura 2 Classificació esquemàtica de les propietats dels materials

A l'ensenyament preuniversitari segurament heu estudiat la Llei de Hooke (figura 3). Per començar el tema anirem al laboratori, comprovant inicialment la Llei de Hooke podrem descobrir altres conceptes importants. Per simplicitat farem un experiment amb una barra d'alumini, l'haguéssim pogut fer amb teixit biològic (os, tendó,...).



$$F = k \Delta l$$

Figura 3. Llei de Hooke



EXPERIMENT: ASSAIG A TRACCIÓ D'UNA BARRA D'ALUMINI

Realitzarem un experiment per iniciar l'estudi de les propietats mecàniques dels materials. Utilitzarem una barra d'alumini, l'estirarem pels dos extrems i mesurarem com es va allargant.

Utilitzarem una màquina de tracció. La màquina disposa de dues mordasses que subjecten la barra d'alumini. La mordassa inferior es mou amb velocitat constant cap a baix. En l'experiment en particular estirarem la barra assolint una velocitat constant de 18 mm/min. La màquina registra la força que ha de realitzar per estirar la barra al llarg del temps.

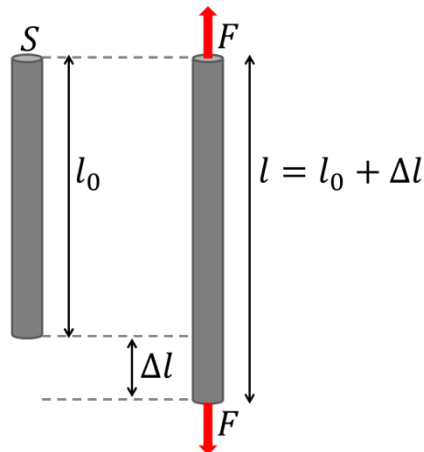


Figura 4. En estirar una barra de longitud l_0 amb una força F es produeix un allargament Δl

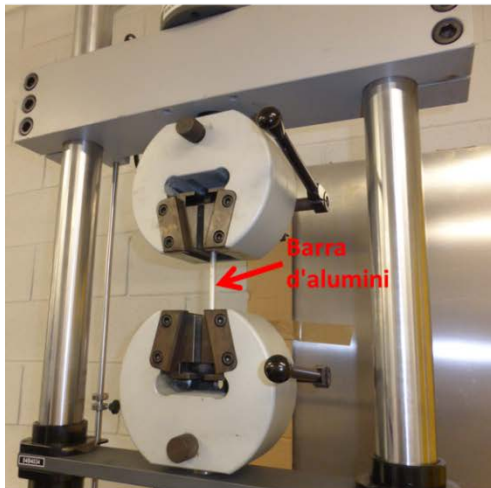


Figura 5. Màquina d'assaig a tracció

Mireu el següent vídeo. Per observar l'allargament de la barra hem enganxat un pal de fusta a la mordassa superior, d'aquesta manera podem veure clarament com augmenta la distància entre les dues mordasses.



Figura 6. Detall de la barra d'alumini [\(enllaç al vídeo\)](#)

En el vídeo s'observa com la barra es va allargant. En els darrers segons es pot veure com a la part superior de la barra apareix un estrenyiment, que es fa cada cop més pronunciat fins que la barra es trenca.



Figura 7. Estat final de la barra un cop trencada. S'observa una reducció del diàmetre.

Al següent vídeo veiem quina és la força i l'allargament que realitza la màquina al llarg del temps.



Figura 8. Visor de la màquina de tracció. Les dades es poden llegir al visor o des d'un ordinador [\(enllaç al vídeo\)](#)

Si mireu el vídeo, l'aneu aturant i anotant alguns valors podeu construir la gràfica força-allargament. Obtindreu el resultat que es presenta a la figura 9.

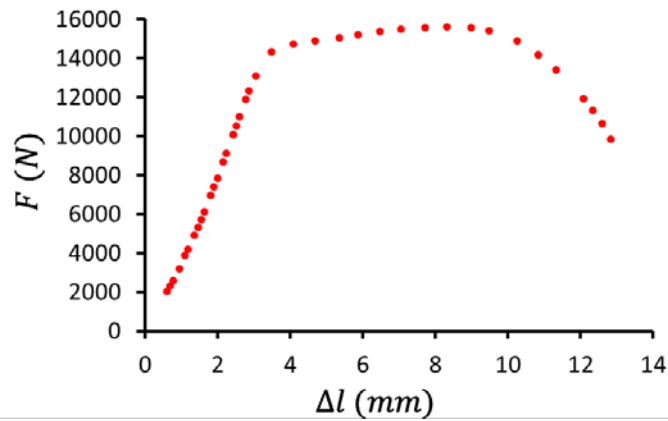


Figura 9. Allargament produït a la barra d'alumini en funció de la força al llarg del temps

Es distingeixen tres comportaments diferents: un primer comportament on l'allargament és proporcional a la força, un segon on l'allargament també sembla aproximadament proporcional a la força però on cal augmentar poc la força per aconseguir estirar la barra, i un tercer comportament on disminueix la força a fer per allargar la barra.

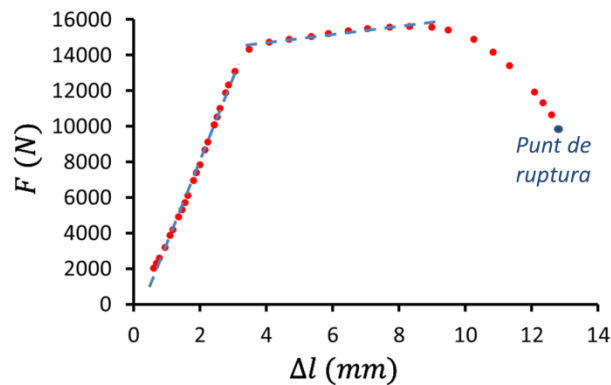


Figura 10. Diferents comportaments observats en estirar la barra d'alumini

A l'última zona, la disminució final de la força es troba associada a la disminució de la secció de la barra d'alumini deguda a l'estrenyiment de la secció. Quan la barra es comença a estrènyer la força per unitat d'àrea en el punt de l'estrenyiment és més gran que a la resta de la barra, en aquest punt s'incrementa la deformació en l'eix de la barra. La força global que hem de realitzar per seguir allargant la barra disminueix a mida que el punt d'estrenyiment es fa més i més petit fins arribar al punt de ruptura, on la barra es trenca.

Si realitzem una ampliació de la gràfica anterior des de $\Delta l = 1 \text{ mm}$ fins a $\Delta l = 3 \text{ mm}$ podem comprovar com, efectivament, el primer tram és lineal. El pendent de la recta ens serveix per determinar la relació entre força i allargament.

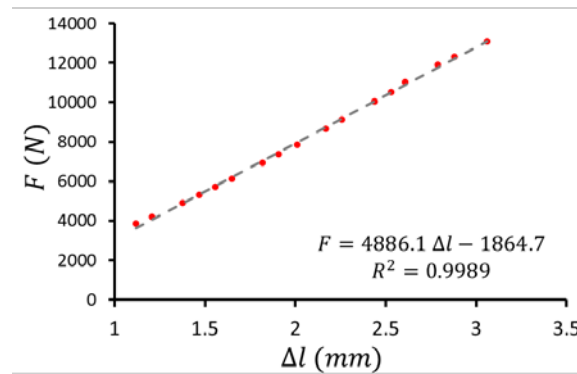


Figura 11. Relació lineal entre força i allargament en el tram inicial de l'experiment

Qüestió 1. Quina força hauria d'haver fet la màquina si enlloc d'estirar una sola barra d'alumini hi haguéssim col·locat dues barres per aconseguir allargar-les 2.5 mm?



Figura 12. Assaig a tracció amb dues barres

Qüestió 2. Quina força hauria d'haver fet la màquina si hagués estirat una barra amb una secció doble de la barra original?

En respondre aquestes qüestions hem de constatar que l'allargament no està relacionat directament amb la força (F), sinó amb la força que realitzem per unitat de secció transversal (S):

$$\frac{F}{S}$$



Imaginem que enlloc d'estirar una barra estirem una cadena. Totes les anelles es troben sotmeses a tensió. Una anella estira de la següent, i així fins l'extrem de la cadena. Cada una de les anelles patirà un allargament Δl . Aquest exemple ens servirà per ajudar-nos a contestar la qüestió següent.



Figura 13. En una cadena totes les baules estan sotmeses a la mateixa tensió

Qüestió 3. Quin serà l'allargament que observarem si estirem una barra d'alumini de la mateixa secció transversal amb una longitud doble de l'original, amb una força de 8000 N?

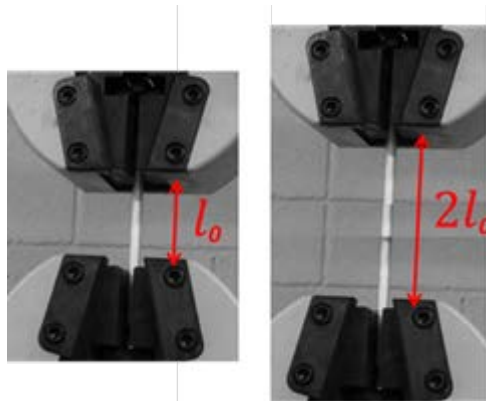


Figura 13. Assajos amb una barra de longitud inicial l_0 i una de longitud $2l_0$

Hem de constatar que quan sotmetem una barra de longitud l_0 a un esforç de tracció tots els segments de la barra estan sotmesos a la mateixa tensió interna i , per tant, l'allargament per unitat de longitud és el mateix. La barra de doble longitud s'ha allargat el doble.

La magnitud característica de l'allargament a considerar és

$$\frac{\Delta l}{l_0}$$



2. Mòdul de Young. Diagrama Esforç-Deformació unitària ($\sigma - \varepsilon$). Diferents tipus d'esforços

De l'anàlisi de les qüestions anteriors podem deduir que existeix una relació que no depèn de la secció ni de la longitud:

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0}$$

A la força per unitat de superfície $\frac{F}{S}$ l'anomenarem *esforç* (σ), a l'allargament per unitat de longitud $\frac{\Delta l}{l_0}$ l'anomenarem *deformació unitària* (ε). L'expressió anterior la podem escriure com:

$$\sigma = E \varepsilon$$

Al quocient entre les dues magnituds, E , l'anomenem **mòdul d'elasticitat** o **mòdul de Young**.

$$E = \frac{F/S}{\Delta l/l_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

És important adonar-se que el mòdul d'elasticitat geomètricament és el pendent de la recta en el diagrama esforç-deformació. Aquesta constatació geomètrica la podrem utilitzar per situacions on la relació entre σ i ε no siguin tan simples.

El mòdul d'elasticitat és una propietat característica de cada material. D'aquesta manera avaluant l'esforç de tracció i l'allargament d'una barra, si mesurem la seva secció transversal i la seva longitud podrem determinar el mòdul d'elasticitat.

L'esforç ($\sigma = \frac{F}{S}$) es mesura en $\frac{N}{m^2}$, és a dir Pascals; la deformació unitària ($\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$) és adimensional, i per tant el mòdul d'elasticitat E es mesura també en $\frac{N}{m^2}$ o Pa .

En l'experiment anterior, si a més de mesurar la força de tracció mesuréssim també el diàmetre al llarg del temps, constataríem que el comportament de l'alumini és semblant al de la figura

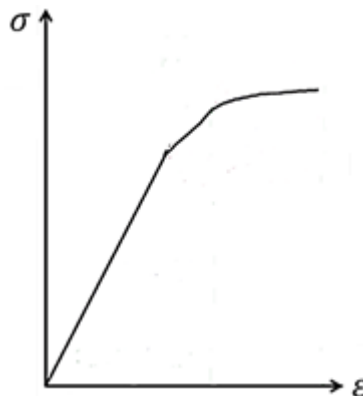


Figura 14. Diagrama esforç-deformació unitària d'un metall comú



No s'observa la disminució que havíem mesurat a l'estirar la barra deguda en aquest cas a la disminució de la secció.

Aquest tipus de diagrama, que es coneix com **diagrama d'esforç-deformació**, és diferent per cada tipus de material.

Podem distingir diferents zones en aquest diagrama:

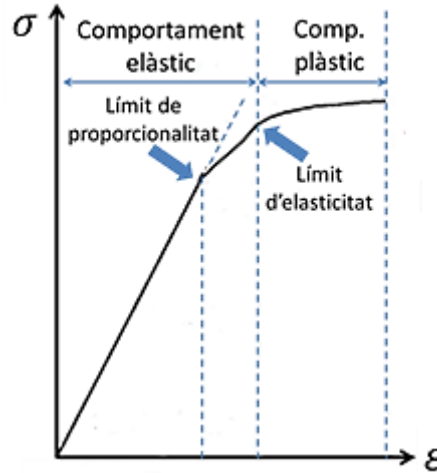


Figura 15. Divisió del diagrama $\sigma - \varepsilon$ mostrant els diferents comportaments dels materials

Una primera zona, de comportament elàstic, on hi ha una relació lineal entre l'esforç i la deformació. En aquesta zona el mòdul d'elasticitat (E) és manté constant. En aquesta zona es compleix el que es coneix com **Llei de Hooke**, on l'allargament i la força són proporcionals:

$$F = k \Delta l$$

La relació

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0}$$

la podem reordenar i reconèixer quin és el valor de la constant k de la Llei de Hooke

$$F = \frac{E S}{l_0} \Delta l$$

$$k = \frac{E S}{l_0}$$

A partir del límit de proporcionalitat, el mòdul E deixa de ser constant. A partir de cert valor de deformació (límit d'elasticitat), si deixem de realitzar esforç, la barra ja no recupera la seva longitud inicial, queda una deformació permanent ($l_{\infty} > l_0$). El límit d'elasticitat i de proporcionalitat poden tenir el mateix valor. Quan apareix una deformació permanent afirmem que hem arribat a la zona plàstica.

Finalment, a partir de cert esforç, la barra es trenca. Parlem del límit de ruptura (el darrer punt de la corba).

A la figura següent podem trobar quin és, en ordre de magnitud, el valor del mòdul d'elasticitat (E) de diversos materials:

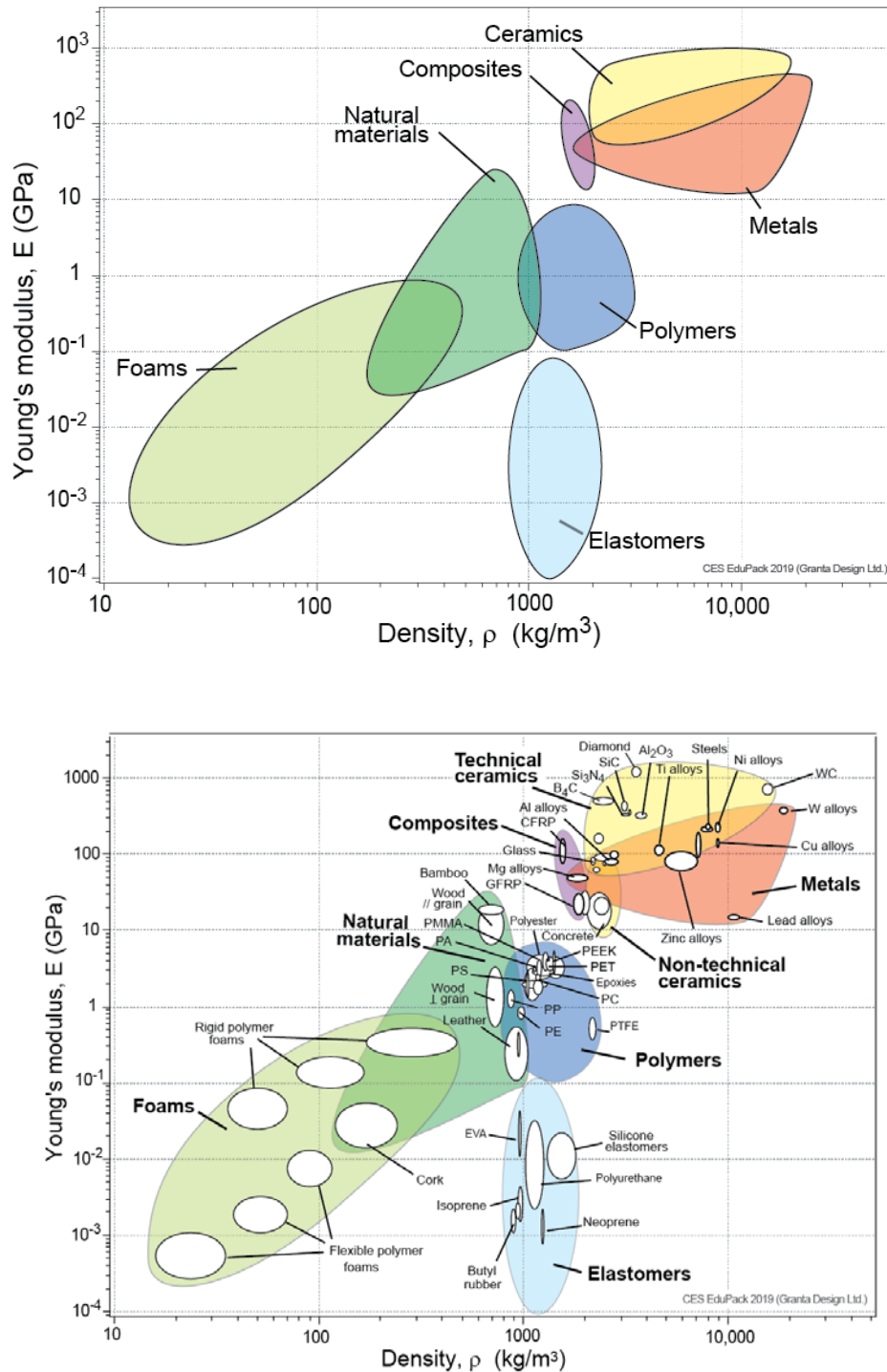


Figura 16. Magnituds del mòdul Young de diferents materials front la seva densitat
(Charts created using CES EduPack 2018, Granta Design Ltd.)

A la figura 16 observem que les magnituds del mòdul de Young són GPa (10^9 Pa). Cal estar atents els eixos de les gràfiques no són lineals, els dos eixos són logarítmics. Els materials ceràmics són els que tenen el mòdul de Young més gran, després trobem els metalls, però aquest són molt més densos. Els polímers i els materials biològics tenen mòduls d'elasticitat de la mateixa magnitud, però la densitat dels materials biològics és inferior. Podem constatar també que alguns materials biològics com el bambú tenen mòduls de Young semblants al d'alguns metalls, tot i tenir densitats molt més baixes.



Els polímers naturals com ara la llana o els tendons tenen densitats baixes, per sota de $2 \frac{g}{cm^3}$, i alhora rigideses que poden ser de l'ordre de 10 GPa (cel·lulosa). La majoria de biominerals tenen densitats per sota dels $5 \frac{g}{cm^3}$ amb rigideses de fins a 100 GPa (hidroxiapatita, calcita). Reduir al mínim la densitat és freqüentment un objectiu en la fabricació de materials sintètics, els materials biològics orienten la investigació per al disseny de nous materials.

Taula 2. Algunes característiques importants de materials naturals i materials sintètics

Tipus de materials		
Materials naturals	Exemples	Materials usats per la tecnologia humana
Ceràmics	Closques de mol·luscs, ossos i dents.	Ceràmics
Polímers	Ungles i banyes, seda, exoesquelets d'artròpodes, lligaments i tendons.	Polímers
Elastòmers	Pell, múscles, vasos sanguinis.	Metalls
Materials cel·lulars	Plomes, interior de becs, fusta.	Densitats fins 10 g/cm^3 Materials homogenis Ús extensiu dels metalls
Densitats $< 3 \text{ g/cm}^3$ Mòdul de Young entre 0.001 i 100 GPa Formats bàsicament per C, N, Ca, H, O, Si, P Absència de metalls Multifuncionalitat		

Compressió

En estirar una barra d'alumini hem observat una gràfica característica d'esforç-deformació d'un material sotmès a tracció. Hem constatat l'existència d'una zona elàstica on l'esforç i la deformació són proporcionals

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0}$$

Hem vist, també, que la constant de proporcionalitat s'anomena **mòdul d'elasticitat** o **mòdul de Young**.

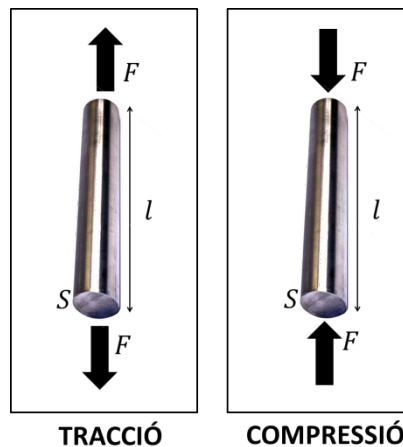


Figura 17. Una barra pot ser sotmesa a tracció o a compressió, entre altres possibles esforços



En l'exemple estudiat la barra era sotmesa a un esforç de tracció. Si sotmetem un objecte a un esforç de compressió també observarem una deformació, en aquest cas disminuint la seva longitud. En els sòlids més simples els valors del mòdul de Young per la tracció i la compressió són iguals. En materials biològics o en altres materials complexos el comportament a tracció i a compressió són diferents, tal com podeu veure a la Taula 3.

Taula 3. Valors representatius del Mòdul de Young i l'esforç de ruptura de diferents materials

MATERIAL	$E \left(\frac{N}{m^2} \right)$	Ruptura per tracció $\left(\frac{N}{m^2} \right)$	Ruptura per compressió $\left(\frac{N}{m^2} \right)$
Alumini	70×10^9	200×10^6	
Coure	120×10^9	300×10^6	
Acer	200×10^9	500×10^6	
Granit	50×10^9		200×10^6
Closca d'ou	0.06×10^9	1.2×10^6	
Os (tracció)	16×10^9	200×10^6	
Os (compressió)	9×10^9		270×10^6
Fusta	8×10^9	40×10^6	100×10^6
Poliestirè	3×10^9	50×10^6	100×10^6

A la taula 3 podem observar com els mòduls de Young i els esforços de ruptura per tracció o compressió en materials biològics poden ser francament alts. És important recordar que les densitats dels teixits biològics són alhora substancialment més baixes que la dels metalls.

Coefficient i Mòdul de compressibilitat

Si augmentem la pressió a la que es troba sotmès un sòlid, per exemple submergint-lo en aigua, l'estem sotmetent a compressió en totes les direccions. L'objecte disminuirà la longitud de totes les seves dimensions, per tant disminueix el seu volum.

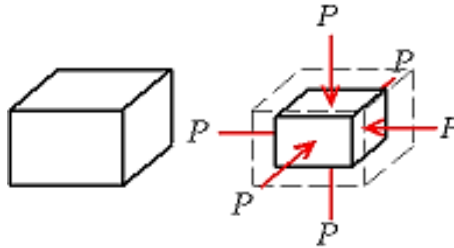


Figura 18. Un sòlid sotmès a un increment de pressió disminueix el seu volum

La disminució unitària de volum és proporcional a l'augment de pressió:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -k \Delta P$$

La constant de proporcionalitat k l'anomenem **coeficient de compressibilitat (k)**.

Per ser rigorosos, definim com a coeficient de compressibilitat a:

$$k = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$



On el subíndex T indica que es manté la temperatura constant. Si la temperatura varia el volum també varia com a conseqüència de la dilatació tèrmica.

L'invers del coeficient de compressibilitat s'anomena **Mòdul de compressibilitat (K)**

$$\Delta P = -K \frac{\Delta V}{V_0}$$

$$K = -V \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T$$

Mòdul de Poisson

Tal com hem observat en l'experiment, en sotmetre una barra cilíndrica a tracció aquesta s'allarga i, alhora normalment, disminueix el seu radi. Si la sotmetem a compressió s'escurça i augmenta el seu radi.

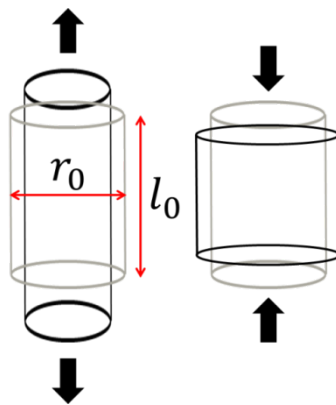


Figura 19. En una barra en estirar-la o comprimir-la varia la seva longitud i també varia el seu diàmetre.

Considerem una barra cilíndrica, anomenem deformació unitària longitudinal a:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Anomenem deformació unitària transversal a:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta r}{r_0}$$

Es defineix com coeficient o **mòdul de Poisson** al quocient entre aquestes dues magnituds:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

Qüestió 4. Per què s'utilitza el signe negatiu en la definició de mòdul de Poisson?

**Altres tipus d'esforços**

Fins aquest moment hem parlat tan sols d'esforços de tracció i compressió. Existeixen altres tipus d'esforços. Cada tipus d'esforç produeix un tipus característic de deformació, i cada una d'elles pot ser estudiada matemàticament de forma semblant a la tracció o a la compressió.

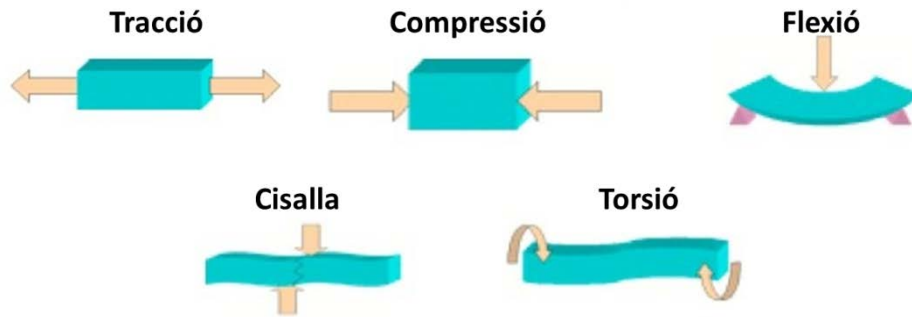


Figura 20. Diferents tipus d'esforços mecànics sobre una barra

Exemples:



Figura 21. Deformació provocada per un esforç de flexió

Els diferents materials biològics estan optimitzats per suportar correctament els esforços als que es veuen sotmesos amb normalitat.



Figura 22. Ossos i músculs suporten satisfactòriament esforços de tracció (2) o compressió (1)

Els ossos suporten molt bé esforços de tracció o compressió. A l'exemple de la figura: (1) el radi i el cúbit estan sotmesos a compressió, (2) el radi i el cúbit estan sotmesos a tracció. Malgrat l'elevada capacitat de suportar esforços de tracció o compressió, els ossos són poc resistents a esforços de flexió, cisalla o torsió.



Qüestió 5. Considerem un home de 70 kg que inicialment està estirat. Calculeu el canvi en la longitud del fèmur quan es posa dret i aquest os suporta el pes corresponent a 62 kg. Per fer el càlcul assumiu que el fèmur és equivalent a una barra uniforme de 40 cm de longitud i un radi de 2 cm.

A la figura adjunta es mostra una fractura espiroide causada per un esforç de torsió en un aterratge de paracaigudisme.

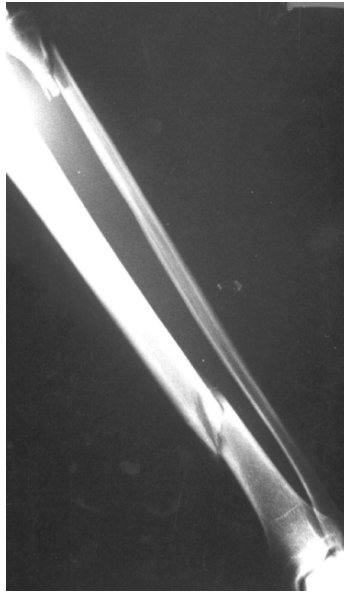


Figura 23. Radiografia d'una fractura provocada per un esforç de torsió



Figura 24. Alguns arbres resisteixen satisfactòriament importants esforços de flexió

Qüestió 6. Els materials biològics en molts aspectes tenen un comportament elàstic força òptim per a la funció que han de complir. Quin és el mecanisme que ha permès assolir aquesta optimització?



3. Treball. Energia elàstica

Qüestió 7. Quin és el treball que hem realitzat en estirar la barra d'alumini, en el nostre experiment, des d'una deformació de 1 mm fins una deformació de 3 mm?

Resposta: En una definició elemental, treball és força per desplaçament ($W = F \Delta x$), en el nostre experiment la força no és constant, sinó que augmenta linealment. D'altra banda el desplaçament coincideix amb la deformació $\Delta x = \Delta l$. Si utilitzem notació diferencial escriurem:

$$dW = F dl$$

Si fem un procés, el treball total l'haurem de calcular mitjançant:

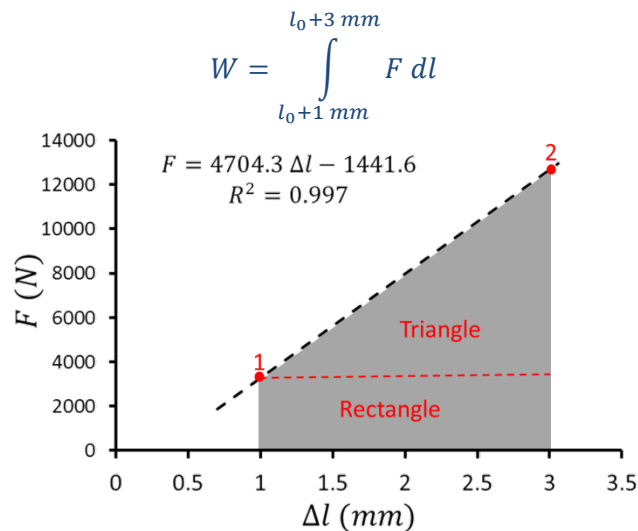


Figura 25. Àrea sota la recta dels punts 1 al 2

Gràficament coincideix amb l'àrea que queda per sota de la corba:

Podem per tant calcular el treball sumant les àrees del rectangle i del triangle de la figura. Utilitzarem $F = 4704.3 \Delta l - 1441.6$, on la força està expressada en N i el desplaçament en mm.

	Desplaçament (mm)	Força (N)
Punt 1	1	3262.7
Punt 2	3	12671.3

Àrees:

$$A_{\text{Rectangle}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m } 3262.7 \text{ N} = 6.5254 \text{ J}$$

$$A_{\text{Triangle}} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ m } (12671.3 - 3262.7) \text{ N}}{2} = 9.4086 \text{ J}$$

Treball:

$$W = 6.5254 \text{ J} + 9.4086 \text{ J} = 15.934 \text{ J} \approx 16 \text{ J}$$

Aquest treball realitzat per la màquina per tal d'estirar la barra, ha quedat acumulat en forma d'energia potencial elàstica. L'exercici ens mostra que una magnitud important a considerar en estudiar un material és l'energia que pot absorbir durant la seva deformació. Si ens mantenim dins del comportament elàstic tota l'energia acumulada es pot recuperar. Si entrem dins de la zona de comportament plàstic no es pot recuperar tota l'energia, atès que una part d'energia ha provocat canvis irreversibles a escala molecular.



Treball

Com hem pogut veure en l'exemple anterior podem calcular el treball realitzat en estirar un material calculant l'àrea sota la corba $F - l$.

$$W = \int_{l_0}^{l_0 + \Delta l} F dl$$

El mateix resultat l'obtenim si calculem l'àrea sota la corba $F - \Delta l$, tal com veure a la figura 26. De fet són la mateixa gràfica però una desplaçada respecte l'altra, per tant l'àrea sota la corba és la mateixa.

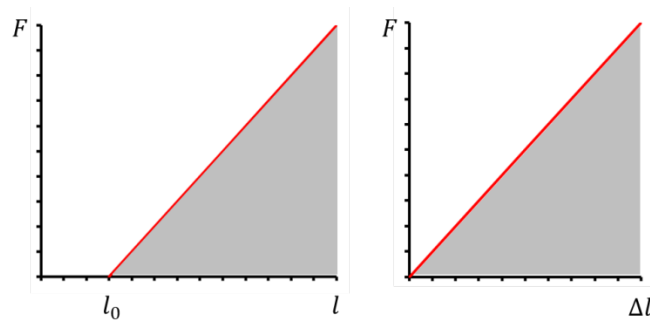


Figura 26. Representació de F front l i de F front Δl . L'àrea sota la corba és la mateixa.

Energia elàstica

Considerem una barra de longitud l_0 i secció transversal S en un procés d'allargament dins de la zona elàstica (figura 27, A), el treball que realitzem és l'àrea que queda sota la corba:

$$W = \frac{1}{2} F \Delta l$$

On F i Δl són els valors del punt b . Aquest treball acumula **energia elàstica** en el material:

$$E_{elàstica} = \frac{1}{2} F \Delta l$$

En el procés on anem retornant a la longitud inicial (figura 27, B) la barra realitza treball utilitzant l'energia elàstica que ha acumulat. També el podem calcular amb l'àrea sota la corba

$$W = -\frac{1}{2} F \Delta l$$

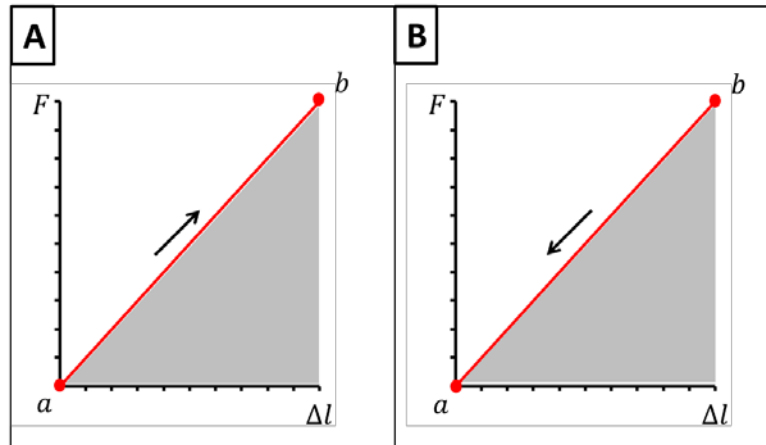


Figura 27. Força i allargament en estirar una goma (A) i en retornar a les condicions inicials (B)

El mateix resultat obtingut al·gèbricament:

La força que realitzem és:

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow F = \frac{E S}{l_0} \Delta l = \frac{E S}{l_0} (l - l_0)$$

El treball que realitzem és per tant

$$\begin{aligned} W &= \int_{l_0}^{l_0 + \Delta l} F dl = \frac{E S}{l_0} \left(\int_{l_0}^{l_0 + \Delta l} l dl - \int_{l_0}^{l_0 + \Delta l} l_0 dl \right) = \frac{E S}{l_0} \left(\left[\frac{l^2}{2} \right]_{l_0}^{l_0 + \Delta l} - l_0 [l]_{l_0}^{l_0 + \Delta l} \right) = \\ &= \frac{F}{\Delta l} \left(\frac{(l_0 + \Delta l)^2}{2} - \frac{l_0^2}{2} - l_0(l_0 + \Delta l) + l_0^2 \right) = \frac{F}{\Delta l} \left(\frac{l_0^2}{2} + l_0 \Delta l + \frac{\Delta l^2}{2} - \frac{l_0^2}{2} - l_0^2 - l_0 \Delta l + l_0^2 \right) = \\ &= \frac{F}{\Delta l} \frac{\Delta l^2}{2} = \frac{1}{2} F \Delta l \end{aligned}$$

Treball i energia superat el límit elàstic

Considerem que estirem una barra fins superar el límit elàstic (figura 28). En disminuir la força la barra ja no retorna a la longitud inicial malgrat que deixem totalment de fer força. L'àrea que queda sota la corba vermella és el treball que fem en estirar la barra, l'àrea que queda sota la corba blava és el treball que recuperem. L'àrea, en gris, entre les dues corbes és l'energia que s'ha perdut, s'ha dissipat en forma de calor.

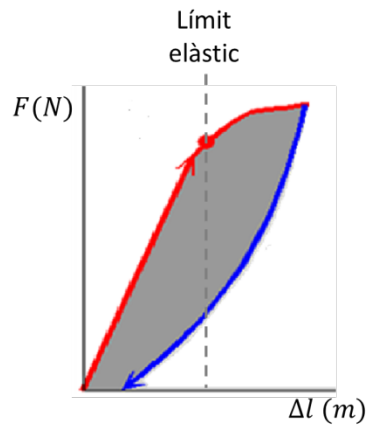


Figura 28. Procès en estirar una barra per sobre del límit elàstic i de disminuir posteriorment la força. La barra no recupera la seva longitud inicial. L'àrea en gris és l'energia dissipada en forma de calor.

Energia elàstica

Per algunes funcions biològiques un dels aspectes importants és l'energia elàstica que pot absorbir un determinat material.

Si la deformació es produeix dins del límit elàstic, tota l'energia es pot recuperar. Aquesta propietat es pot utilitzar tecnològicament, un exemple molt senzill és un arc per llençar fletxes.

Molts sistemes biològics utilitzen aquesta estratègia, com per exemple les llagostes o les puces per saltar, o els cavalls per poder córrer. En aquests casos s'acumula energia en els tendons que posteriorment es recupera.



Figura 29. En un arc, a semblança amb els tendons d'alguns sistemes biològics, acumulem energia elàstica que convertim en energia cinètica de forma molt ràpida.

Un cas especialment interessant és el de la seda d'aranyes o cucs de seda amb una especial capacitat d'absorbir energia. Això fa aquests materials molt atractius tecnològicament.

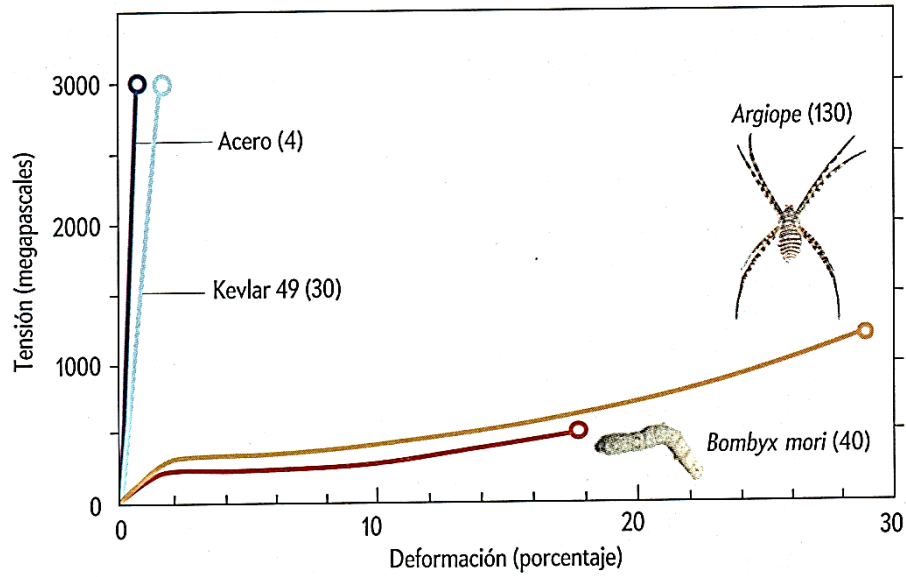


Figura 30. Diagrames esforç-deformació de diferents materials. Entre parèntesi s'indica l'energia que es pot absorbir per unitat de massa expressada en kJ/kg. Destaca l'energia que poden absorbir les sedes sintetitzades per aranyes o pels cucs de seda.



4. Col·lagen i elastina

El col·lagen i l'elastina són dues proteïnes molt importants per poder aproximar-nos al comportament de molts teixits biològics. El col·lagen és la proteïna més abundant en el cos humà. Tant el col·lagen com l'elastina són proteïnes que formen fibres amb propietats elàstiques, les trobem a l'exterior de les cèl·lules, formant part de la matriu extracel·lular. A partir d'una qüestió ens acostarem a la compressió d'alguna de les seves propietats.

Qüestió 7. Considerem una molla metàl·lica de filferro fi, de secció S . Deduïu com serà qualitativament el diagrama esforç-deformació si l'estirem. Alternativament podem pensar en un rínxol de cabell on observarem un comportament qualitativament similar.

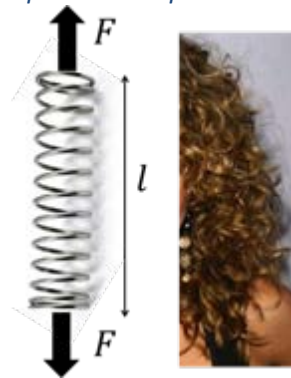


Figura 31. En una molla, o en un conjunt de cabells rinxolats el diagrama esforç-deformació depèn de l'estructura macroscòpica del sistema



Figura 32. Representació esquemàtica del diagrama $\sigma - \epsilon$ per una molla

El col·lagen, la proteïna més abundant del cos humà, és un polímer natural. És una proteïna més aviat rígida i dura. És un material estructural bàsic en els sistemes biològics per tot tipus de teixits. Està present en diferents òrgans i teixits i proporciona integritat estructural.

El podem comparar amb l'acer en les estructures i màquines mecàniques, no per la seva força, sinó perquè és un component estructural bàsic en el nostre cos. L'acer és l'element principal en les estructures de construcció o altres estructures mecàniques. En els organismes vius, el col·lagen juga el mateix paper: és la component principal, el trobem en vasos sanguinis, en tendons, en l'os, en el múscul, etc. En rates, el 20% de les proteïnes són col·lagen. Els éssers humans són similars a les rates en la fisiologia i el comportament mecànic, podem considerar que tenim la mateixa proporció de col·lagen entre les proteïnes.

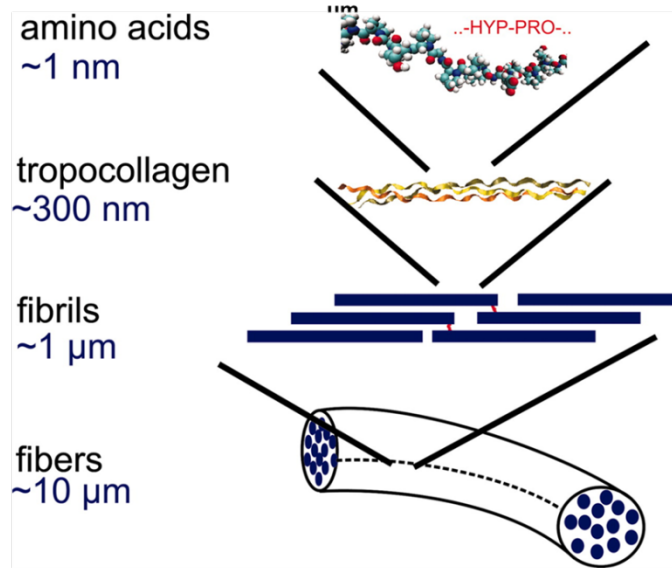
El col·lagen es un tipus de proteïnes però no una única proteïna, els col·làgens tenen diferents composicions. Aproximadament s'han identificat 20 tipus de composicions d'aminoàcids de col·lagen i el seu nombre està augmentant contínuament. En els éssers humans (i rates) el



col·lagen és del mateix tipus, anomenat Tipus I. Altres col·làgens s'anomenen II, X, etc. La composició d'aminoàcids de diferents col·làgens difereix lleugerament.



Schematic view of some of the hierarchical features of collagen, ranging from the amino acid sequence level at nanoscale up to the scale of collagen fibers with lengths on the order of 10



Markus J. Buehler PNAS 2006;103:12285-12290

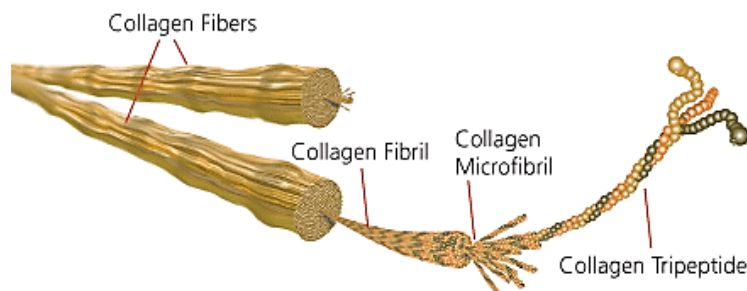


Figura 33. El col·lagen està estructurat jeràrquicament, tal com es mostra a les dues figures

La síntesi del col·lagen es realitza majoritàriament per unes cèl·lules especialitzades, els fibroblasts. El procés es realitza parcialment de forma intracel·lular i parcialment de forma extracel·lular. A diferència de la síntesi de materials fabricats per humans on s'utilitzen temperatures i pressions que poden ser molt elevades la síntesi de tots els materials biològics es realitza a temperatures i pressions baixes.

En el següent vídeo podem veure com en un teixit l'orientació de les fibres de col·lagen canvia progressivament si canviem la direcció de l'esforç al que sotmetem el teixit:

Enllaç al vídeo:

<https://youtu.be/atalSIZSuf8>



Qüestió 8. En quina direcció estaran alineades les fibres de col·lagen en un múscul com el bíceps? En quina direcció estaran alineades en un múscul que envolta una gran arteria?

El col·lagen i l'elastina juguen un rol mecànic molt important en la matriu extracel·lular tal com podem veure en el següent vídeo.

Enllaç al vídeo:

<https://youtu.be/uBQpFiLktqM>

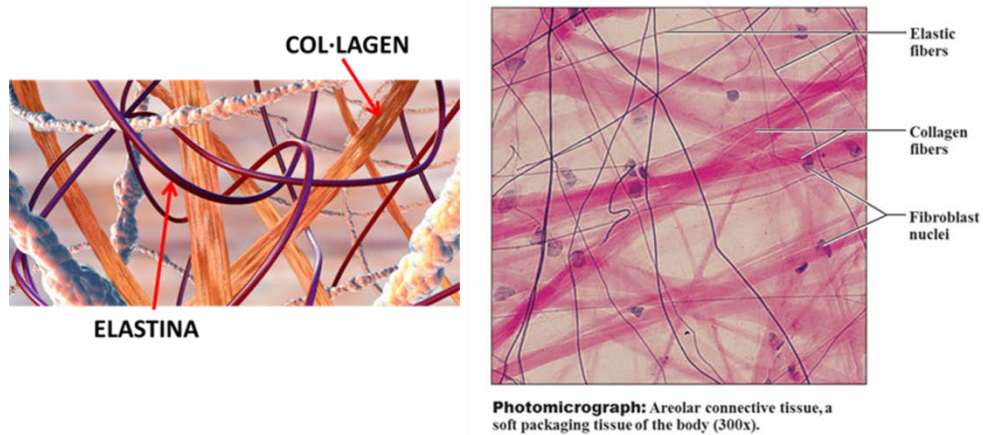


Figura 34. Representacions esquemàtiques del col·lagen i l'elastina en l'espai extracel·lular.

Per tant, per entendre les propietats mecàniques dels teixits caldrà conèixer les propietats mecàniques d'aquestes dues fibres.

Propietats mecàniques del col·lagen

Les fibres de col·lagen responen a esforços de tracció, la seva resistència a esforços de compressió és molt baixa.

En el col·lagen el diagrama esforç-deformació en un esforç de tracció és del tipus:

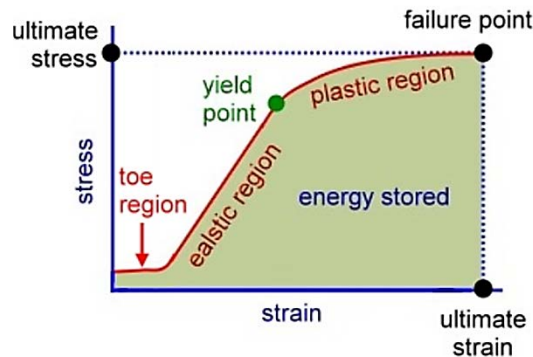


Figura 35. Esquema del comportament elàstic del col·lagen.
Corba esforç-deformació del col·lagen.

Es destacable la presència de la regió *toe*, on es pot produir allargament sense pràcticament aplicar esforç. A la figura següent podem entendre de forma intuïtiva aquests diferents comportaments:

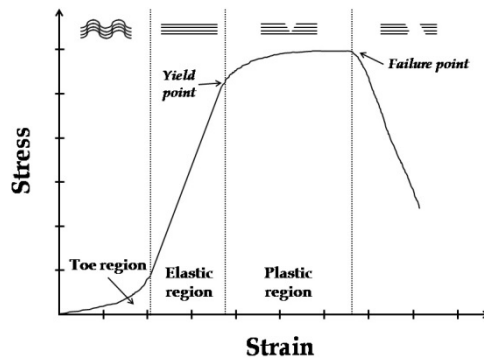


Figura 36. Relació entre l'estructura del col·lagen en les diferents regions de la corba esforç-deformació.

És molt interessant pensar que si hem arribat a la regió plàstica, on es produeixen microfactures, no tornarem ràpidament a les condicions inicials un cop l'esforç disminueixi, però gràcies a la capacitat d'auto-reparació si que ho podrem fer progressivament.

Propietats mecàniques de l'elastina

L'elastina es comporta com un conjunt de gomes elàstiques lligades entre elles. Això ens permet entendre de forma intuïtiva el seu comportament que es mostra als esquemes següents.

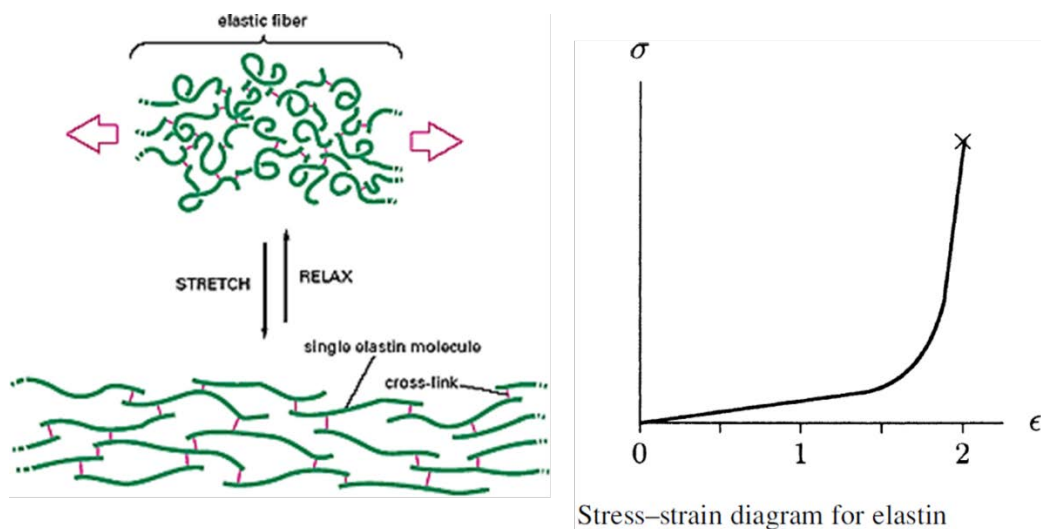


Figura 37. Esquema de l'estructura de l'elastina i del seu diagrama esforç-deformació

L'elastina presenta un comportament elàstic (reversible) fins i tot per grans deformacions. Les fibres d'elastina es comporten elàsticament amb baixa rigidesa fins aproximadament 200% - 250% d'allargament, seguit per una regió curta on la rigidesa augmenta bruscament fins a la ruptura.



Comportament conjunt de teixits amb col·lagen i elastina

El comportament de teixits amb elastina i col·lagen podem arribar-los a entendre si considerem les propietats de cada una d'elles actuant conjuntament.

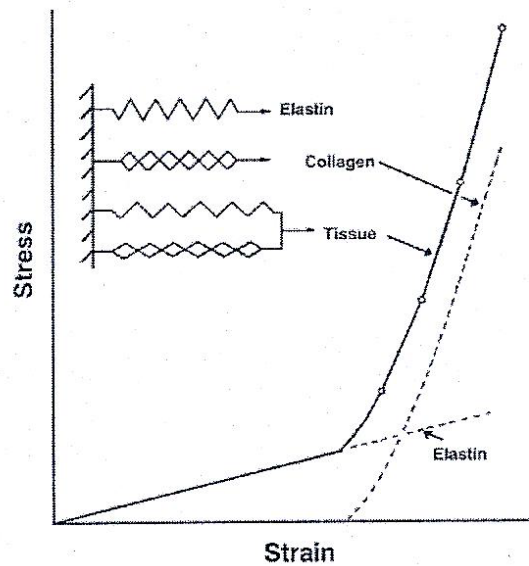


Figura 38. Corba esforç-deformació d'un teixit amb col·lagen i elastina

La representació mecànica de la figura 39 ens pot facilitar la comprensió d'un teixit amb les dues fibres, col·lagen i elastina.

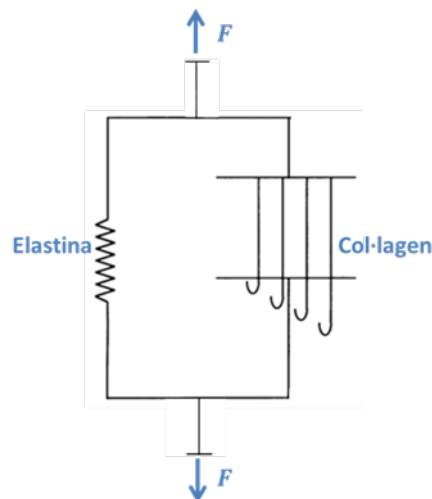


Figura 39. Model mecànic d'un teixit amb col·lagen i elastina.

Podem relacionar la composició en col·lagen i elastina amb les funcions que han de complir els teixits. A la taula següent es mostra la composició d'alguns teixits i es discuteix posteriorment la relació entre composició i funció.



Taula 4. Propietats mecàniques i composició d'alguns teixits

Material	Ultimate tensile strength [Mpa]	Ultimate tensile strain [%]	Collagen (% dry weight)	Elastin (% dry weight)
Tendon	50-100	10-15	75-85	< 3
Ligament	50-100	10-15	70-80	10-15
Aorta	0.3-0.8	50-100	25-35	40-50
Skin	1-20	30-70	60-80	5-10
Articular Cartilage	9-40	60-120	40-70	-

Els tendons uneixen músculs i ossos, els cal especialment mostrar rigidesa per transmetre les forces, per això els tendons estan constituïts majoritàriament de col·lagen. Per exemple, el tendó de la nuca de la vaca (part posterior del coll). A causa de l'important pes del cap de la vaca, aquest lligament ha de ser compatible amb treballs a altes tensions. Alhora, ha de permetre els moviments normals del cap de la vaca. Per tant, a petites deformacions de les fibres d'elastina que proporcionen elasticitat i el col·lagen no actua. A major deformació, el col·lagen garanteix la integritat del lligament.

Els lligaments uneixen ossos entre si, el fet de no estar connectats a músculs, ens fa veure que els cal certa flexibilitat, per això mostres un cert percentatge d'elastina.

L'aorta, o els grans vasos, han de poder-se dilatar fàcilment, per això tenen un percentatge alt d'elastina, però han de ser resistents per evitar trencaments per tant també necessiten la presència de col·lagen.

La pell també es troba sotmesa a esforços importants, però alhora ha de ser flexible, per aquesta raó en ella hi trobem col·lagen i elastina.

El cartílag articular recobreix les articulacions sinovials com el genoll o el colze, tenen una funció protectora i han de permetre en molts casos moviments en diferents direccions, per això estan composades majoritàriament de col·lagen i no presenten elastina.

5. Materials compostos

Les propietats dels materials queden determinades per la seva composició microscòpica. Existeix una estratègia per aconseguir millorar les propietats mecàniques dels materials, que és la utilització de materials compostos.

Els materials compostos estan fets de dos o més materials diferents entre ells sense que es combinin químicament. Normalment un dels materials actua com a **fibra** i l'altra com una **matriu** que l'envolta, com per exemple el formigó armat amb barres d'acer en una matriu de formigó. Amb materials compostos podem aconseguir materials que combinin les característiques de ser molt rígids amb poc pes, lleugers, tenaços o resistents a la corrosió, tracció i abrasió. Podem obtenir per exemple materials flexibles i poc densos amb la residència d'un material ceràmic.

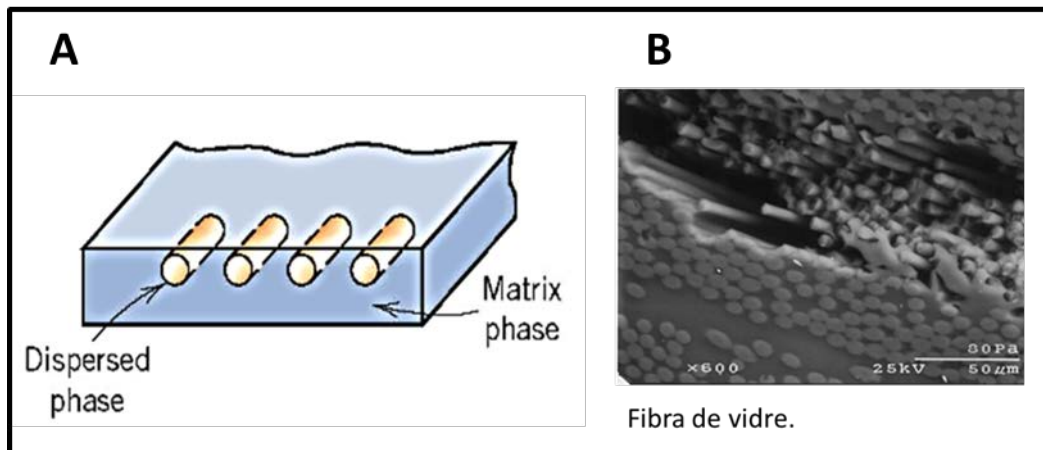


Figura 40. A Esquema d'un material compost amb fibres i matriu.
 B Microfotografia de fibra de vidre

Exemples de materials biològics:

Fusta: fibres de cel·lulosa envoltades i sostingudes per lignina que és rígida)

Os: col·lagen i mineral (composició mitjana dels ossos: 25 % aigua, 45 % de minerals com fosfats y carbonats de calci, 30 % de matèria orgànica, principalment col·lagen i altres proteïnes).

Actualment molts materials sintètics són compostos cercant la suma de propietats.

Taula 5. Exemples de materials compostos

Material	Components
Fusta	Cel·lulosa, material rígid i fibrós, combinada amb lignina, adhesiu.
Cutícula artròpodes	Fibres de quitina en una matriu proteica.
Closques de mol·lusc	Capes de material rígid separades per capes fines proteiques.
Fibra de vidre	Fibres rígides de vidre mesclades amb adhesiu tou.
Formigó armat	Formigó, material relativament fràgil a tracció, armat amb acer dolç.



Mòdul de Young en materials compostos

En els materials compostos formats per fibres i una matriu, la resposta als esforços serà diferent si és en la direcció de les fibres (tracció o compressió longitudinal) o en la direcció perpendicular a les fibres (tracció o compressió transversal).

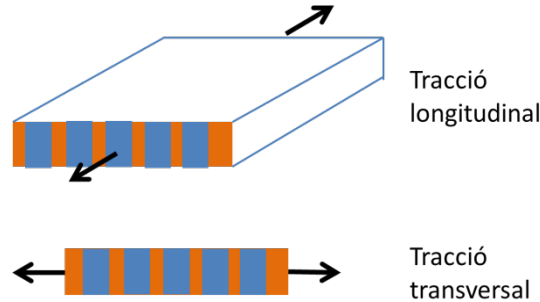


Figura 41. Esforços longitudinal i transversal sobre un material compost

En un cas ideal, en la tracció o compressió longitudinal la deformació unitària dels dos materials serà la mateixa, en canvi l'esforç suportat per cada material serà diferent. I en la tracció o compressió transversal els dos materials suportaran el mateix esforç però tindran deformacions unitàries diferents.

- Mòdul de Young en la direcció de les fibres (valor màxim)

Podem estimar quina és la resistència d'un material compost si realitzem si utilitzem algunes simplificacions. Considerem un material compost on les fibres estan alineades en determinada direcció, quan sotmetem el material a un esforç de tracció, podem considerar que l'esforç es suportat per la matriu i per la fibra proporcionalment al volum ocupat per cada fase, v_m i v_f són les fraccions de volum corresponents a cada una de les fases:

$$\sigma_c = \sigma_m v_m + \sigma_f v_f$$

Podem considerar també que la deformació unitària és la mateixa per les dues fases:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

Llavors si

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c$$

$$\sigma_m v_m + \sigma_f v_f = E_c \varepsilon_c$$

$$E_c = \frac{\sigma_m v_m + \sigma_f v_f}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_m v_m}{\varepsilon_m} + \frac{\sigma_f v_f}{\varepsilon_f} = E_m v_m + E_f v_f$$

Veiem doncs que el mòdul de Young estimat en la direcció de les fibres és:

$$E_c = E_m v_m + E_f v_f$$



- Mòdul de Young en la direcció transversals a les fibres (valor mínim)

Considerem que l'esforç que suporten els dos materials és el mateix

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$$

La deformació dels materials serà diferent, la deformació dependrà de la fracció de volum de cada component

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m v_m + \varepsilon_f v_f$$

Llavors

$$\frac{1}{E_c} = \frac{\varepsilon_c}{\sigma_c} = \frac{\varepsilon_m v_m + \varepsilon_f v_f}{\sigma_c}$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{\varepsilon_m v_m}{\sigma_m} + \frac{\varepsilon_f v_f}{\sigma_f}$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{v_m}{E_m} + \frac{v_f}{E_f}$$

$$E_c = \frac{E_m E_f}{E_f v_m + E_m v_f}$$

Exemple. Mòdul de Young en ossos

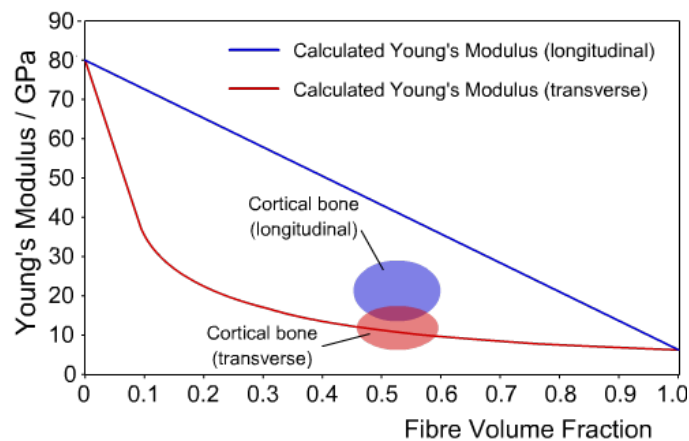


Figura 42. Mòdul de Young en un os en funció de la fracció en volum de les fibres. Les línies s'obtenen utilitzant les propietats de les fibres i la matriu en un sistema ideal, les àrees marcades corresponen al comportament observat experimentalment.

Una divisió dels materials biològics, tenint en consideració la seva composició, la podem fer entre materials mineralitzats i materials no mineralitzats.

En els materials mineralitzats, els components minerals proporcionen resistència a la compressió, rigidesa o aconseguir perfils tallants. Mentre que els materials no mineralitzats en general són més resistent a la tracció que a la compressió, tenen més

BIOFÍSICA

Propietats dels materials

tenacitat i ductilitat ja que normalment estan constituïts per fibres. Els components mineralitzats actuen òptimament en compressió i els no mineralitzats en tracció.

Closques, dents, ossos són exemples de teixits mineralitzats. Músculs, tendons, sang són exemple de teixits no mineralitzats.

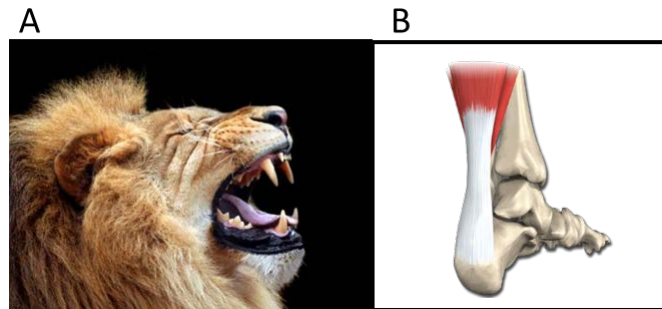


Figura 43. Exemples de teixits mineralitzats i no mineralitzats. A Dents. B Tendons.

Taula 6. A Principals components dels teixits biològics en el cos humà.

B Components estructurals de diferents teixits.

A		B		
Material biològic	Proporció (cos humà)	Materials naturals estructurals		On es troben
Proteïnes	17	Fosfat de calci	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	Dents, ossos, banyes de cervol
Lípids	15	Carbonat de calci	CaCO_3	Aragonita i calcita: Mol·luscs, ous, crustacis
Carbohidrats	1	Òxid de silici	SiO_2	Esponges, diatomeas
Minerals	7	Òxid de ferro	Fe_3O_4	Magnetita: Bactèries, dents de cuc
DNA, RNA	2	Col·lagen	Polipeptid	Tendons, músculs, ossos, dents
Aigua	58	Quitina	Polisacàrid	Artròpodes, insectes
		Cel·lulosa	Polisacàrid	Plantes
		Queratina	Polipeptid	Ungles, banyes i becs
		Elastina	Polipeptid	Pell, artèries, pulmons



6. Materials viscoelàstics

En els materials viscoelàstics la deformació no tan sols depèn de l'esforç sinó també de la durada a que sotmetem a esforç el material.

Exemple:

https://www.youtube.com/watch?v=8V9VuA_0BDw

Tornarem a parlar d'ells un cop hàgim introduït el concepte de viscositat, en el tema de la Dinàmica de fluids.

Exemple: Malgrat que pugui semblar sorprenent l'os és un material viscoelàstic. Per exemple si el sotmetem a tracció es va deformant (allargant) al llarg del temps. Aquesta propietat, juntament amb la capacitat de sintetitzar noves cèl·lules, s'utilitza pel tractament de les conseqüències de certes malalties com la poliomielitis on alguna extremitat pot ser notablement més curta que l'altra.

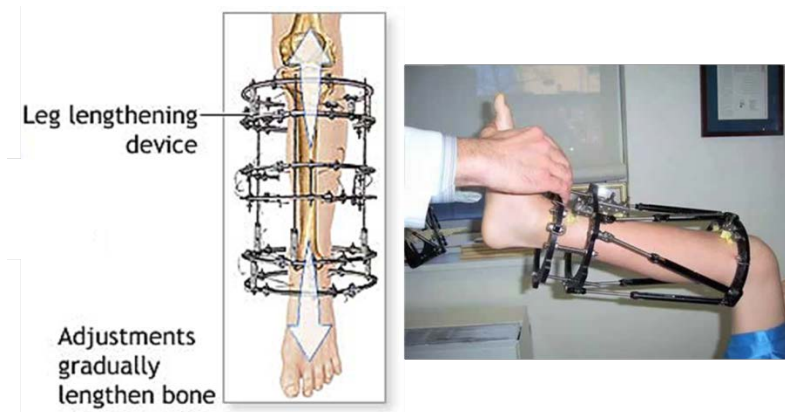


Figura 44. Allargament mecànic de la longitud d'una extremitat per pal·liar els efectes de malalties com la poliomielitis

La relació entre esforç i deformació en els materials viscoelàstics depèn de la velocitat amb que es realitza l'esforç:

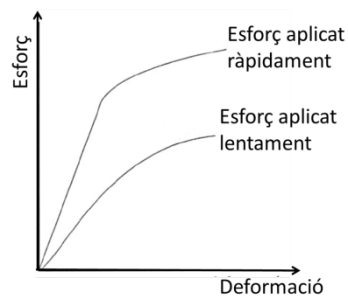


Figura 45. Esquema dels diagrames esforç-deformació per un fluid viscoelàstic en funció de la velocitat.



7. Altres conceptes. Vocabulari

Isòtrop, isòtropa: Dit de les substàncies o mitjans que presenten les mateixes propietats físiques en totes direccions. Una substància pot ésser isòtropa només respecte a una determinada propietat. Les substàncies amorfes són generalment isòtropes, i les cristal·litzades en el sistema cúbic ho són respecte a les propietats òptiques.

Qüestió 9. La majoria de materials biològics són isòtrops? Raoneu la resposta.

Propietats mecàniques dels materials

- Rigidesa
 - Relació entre esforç i deformació (mòdul de Young)
- Límit elàstic
 - Esforç màxim sense deformació permanent
- Resistència
 - Força màxima abans de la ruptura
- Extensibilitat
 - Deformació màxima abans de la ruptura
- Tenacitat
 - Treball durant el procés de deformació
- Resiliència / coeficient de restitució
 - Capacitat d'emmagatzemar energia elàstica i alliberar-la
- Duresa
 - Resistència al ratllat
 - Resistència a la penetració
- Resistència a la fractura
 - Facilitat o dificultat de propagació d'una fissura. Els materials poden ser fràgils o dúctils.



Figura 46. Esquema dels diagrames esforç-deformació d'un material fràgil i d'un material dúctil



Per complir correctament les seves funcions els materials han de complir certes propietats , tal com podem veure a la taula següent.

Taula 7. Propietats mecàniques a complir per satisfer diferents funcions.

Funció	Propietats	Exemples
Amarres	Baixa rigidesa i extensibilitat	Lligament nuca de grans herbívors, amarres d'un vaixell.
Corretges	Flexibilitat i alta rigidesa	Tendons pota posterior de grans herbívors, tendó d'Aquil·les, cadena d'una bicicleta.
Ressorts	Elasticitat i alt coeficient de restitució	Lligaments en articulacions d'ales, valves de mol·luscs, cordes vocals.
Amortidors	Baix coeficient de restitució i alta resistència	Teranyines, lligaments potes animals terrestres, rodes automòbils.
Serres, molins, punxes	Duresa i resistència a la fractura	Dents, ullals, ungles, eines de tall, broques, llimes.

Exemple

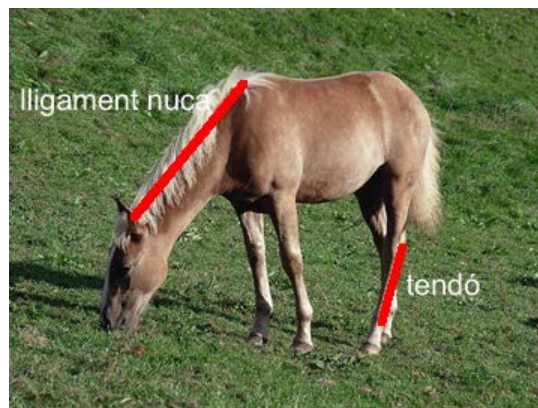


Figura 47. En un cavall o altres grans herbívors les propietats mecàniques del lligament de la nuca o del tendó posterior han de ser diferents.
 Lligament nuca de grans herbívors (amarra): Baixa rigidesa.
 Tendó pota posterior (corretja): Flexibilitat i alta rigidesa.

Fatiga

S'anomena fatiga a la disminució de la resistència a la ruptura d'un material elàstic sotmès a tensions d'intensitat i de signe variables, que pot arribar a trencar-se sense depassar el límit d'elasticitat. Per exemple, és freqüent que els ossos es fracturin sense que s'hagi assolit l'esforç màxim que poden suportar. La fatiga és el dany que es produeix en un material a causa d'esforços repetits per sota de l'esforç màxim. Els cicles de càrrega i descàrrega sobre un material poden arribar provocar la seva ruptura encara que aquestes càrregues estiguin per sota del valor de ruptura. Per exemple, en un os humà un esforç pot provocar una microfractura sense que l'os trenqui completament. Si aquest esforç es repeteix durant diversos cicles consecutius, la microfractura es pot propagar provocant la ruptura total de l'estructura.

BIOFÍSICA

Propietats dels materials

Materials biològics

Materials d'origen biològic, els diferents teixits dels organismes, per exemple els ossos, les plomes, la sang o la pell.



Figura 48. Exemples de materials biològics

Materials biomimètics o bioinspirats

Materials sintetitzats intentant reproduir estratègies d'alguns materials biològics.



Figura 49. El velcro és un exemple d'un material bioinspirat, on s'ha copiat l'estructura microscòpica.



Figura 50. Superfície que s'auto-neteja (Pintura Lotusan) inspirada en la superfície hidròfoba de la fulla de lotus.



Figura 51. Superfícies antilliscants que mimetitza els peus de gossos.

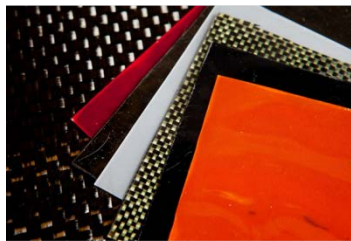
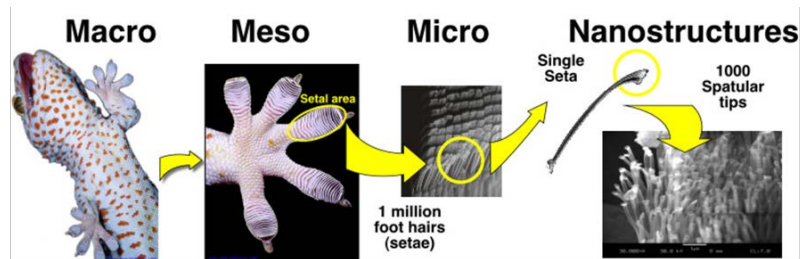


Figura 52. El Sistema adhesiu Geckskin mimetitza la forma d'adherir-se superfícies verticals dels geckos.

Biomaterials

Materials a utilitzar en aplicacions mèdiques, que han de ser compatibles amb els sistemes biològics, des de la dentadura postissa fins un implant de mama per una dona que ha patit càncer o una pròtesis de maluc.

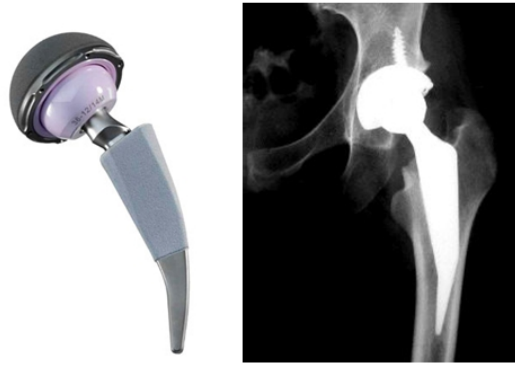


Figura 53. Exemple d'un biomaterial

8. Bibliografia

Meyers et al (2011)
Biological materials: A materials science approach
J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 4, 626-657
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2010.08.005>