# BIOMECCANICA DEI TESSUTI

Ci concentreremo prevalentemente su tessuti molli e su tessuti che hanno una funzione biomeccanica, cioè tessuti che hanno un ruolo di supporto, di trasmissione di forze, di trasporto (come ad esempio il trasporto del sangue) ecc... I tessuti che studieremo saranno quindi i tessuti molli e le loro proprietà da un punto di vista matematico, i tessuti molli sono i tessuti viscoelastici; andremo poi a vedere le molecole del corpo che costituiscono una parte importante/determinante dei tessuti che hanno una funzione biomeccanica, che sono collagene, elastina, cheratina, reticulina ecc... Infine andremo a studiare i tessuti con funzioni specifiche, ad esempio la cartilagine,vista come riduttore di attrito, il legamento visto come un vincolo per il movimento, i tendini come trasmettitori di forza e i vasi come trasportatori di nutrienti, ossigeno e calore. Infine vedremo il muscolo, che ha un ruolo meccanico molto importante, vedremo sia il muscolo scheletrico che cardiaco. Noi studiamo tessuti, non sistemi o organi, quindi le grandezze con cui lavoriamo sono dell'ordine di $10^{-4}$ - $10^{-5}$ m

FORZE E SFORZI -> quando parliamo di meccanica dei materiali utilizziamo sforzi e deformazioni; abbiamo visto la curva sforzo-deformazione, quindi andiamo a ricordare cos'è uno sforzo e cos'è una deformazione
Lo sforzo è uguale a un forza diviso un'area [ $\sigma = F/A$ ], viene misurato in N/m^2 o Pa, lo sforzo è un tensore, quindi ha sempre una direzione e una superficie di riferimento. A seconda della direzione in cui agisce il vettore forza e a seconda della superficie su cui agisce possiamo acere differenti tipi di sforzo, parliamo di : sforzo di tensione (sforzo tensile), sforzo di compressione e sforzo di taglio (schear).

La pressione è una forza per unità di area, non è un tensore, formalmente viene definita come uno scalare, in quanto la pressione è una forza sempre diretta verso una superficie e perpendicolare ad essa, quindi conosciamo già la superficie su cui viene applicata e la sua direzione, l'unità di misura è la stessa, anche la pressione si misura in Pa.
Quando parliamo di pressione in genere utilizziamo come unità di misura mmHg (millimetri di mercurio), per convertire Pa in mmHg basta moltiplicare la grandezza in Pascal per 133.28
Quando parliamo di pressione nel contesto biologico ci riferiamo sempre alla pressione che misuriamo rispetto alla pressione atmosferica, la quale è uguale a 760mmHg, ad esempio diciamo che la pressione sistolica è uguale a 120mmHg rispetto alla pressione atmosferica; non parliamo di pressione assoluta.

Quello che ci interessa è la risposta meccanica dei nostri tessuti biologici.
Il test meccanico viene fatto su un campione, che in generale ha una particolare forma ad osso di cane (dog bone), il campione viene inserito all'interno della macchina di testing e a seguito dell'applicazione di diverse forze vediamo quanto il campione si allunga e diminuisce la propria sezione, la macchina da testing sottopone il campione ad uno sforzo tensile che avviene lungo un unica direzione, fino a portarlo a rottura.

Quando abbiamo però dei materiali biologici, quali ad esempio pelle, osso o vari tessuti, è quasi impossibile tagliarlo come si deve in modo tale da ottenere la forma ad osso di cane; sorge quindi un grande problema su come misurare e dove misurare le proprietà meccaniche dei tessuti, se un tessuto è molto morbido già solamente prendendolo con delle pinze lo andiamo ad allungare e deformare; un altro problema che abbiamo è che i nostri tessuti sono bagnati, quindi dobbiamo adattare la macchina da testing anche a questa condizione, dobbiamo mettere ad esempio una vaschetta di acqua, dobbiamo cercare di riprodurre anche una particolare temperatura ecc... , in quanto a noi interessa il comportamento meccanico in condizioni reali.
Inoltre le proprietà meccaniche di componenti biologiche dipendono da innumerevoli fattori, quali l'età, il sesso, la presenza di malattie. Quindi non abbiamo valori ben definiti, ma abbiamo un range di valori entro i quali ci possiamo muovere

master COPY COPISTERIA

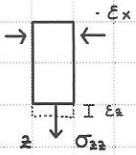
Possiamo fare un rapido ripasso di grandezze già viste nel corso di ECMB, quali il true stress & strain e l'engineering stress & strain

Engineering strain & stress -> $\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$ ; $\sigma = \frac{F}{A_0}$

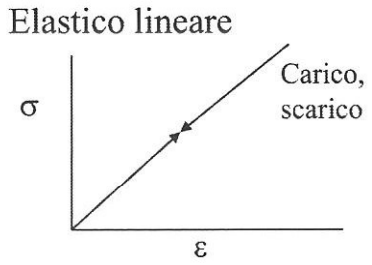
True strain & stress -> $\varepsilon_t = \int_{L_0}^{L} \frac{\Delta L}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1+\varepsilon)$ ; $\sigma_t = \frac{F}{\text{Areale}} = \sigma(1+\varepsilon)$

Ricordiamo che il true stress è sempre maggiore dell'engineering stress, in quanto man mano che il campione si allunga la sezione A diminuisce.

Abbiamo definito anche il rapporto di poisson $\nu$ come : $\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$



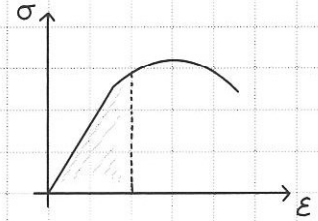

Il rapporto di Poisson sostanzialmente mi dice come un materiale aumenta o diminuisce le proprie dimensioni nelle direzioni perpendicolari rispetto a quella in cui viene applicato lo sforzo, ad esempio applicando uno sforzo $\varepsilon z$ lungo z la diminuzione delle dimensioni del campione lungo x è regolata dal modulo di Poisson, il cui valore dipende dal particolare materiale e si muove entro un range uguale a $1 < \nu < 0{,}5$.
Ricordiamo la definizione di materiale elastico : un materiale elastico è un materiale che quando viene allungato è in grado di tornare nella sua posizione iniziale senza dissipare energia. Un materiale è elastico se la curva sforzo deformazione è unica sia per l'allungamento che per l'accorciamento, quindi i materiali elastici sono non dissipativi.
Se invece i materiali che esaminiamo dissipano energia la curva sforzo-deformazione non è la stessa sia per l'allungamento che per l'accorciamento, ma abbiamo un andamento diverso nei due casi.




$$\int_0^{\varepsilon_x} \sigma\, dx - \int_{\varepsilon_x}^{0} \sigma\, dx = 0$$

Definizione formale di materiale elastico, ovvero formalmente affermiamo che l'area sottesa alla curva andando e tornando è la stessa

Ricordiamo anche che riportando una curva sforzo-deformazione l'area sottesa alla curva coincide con l'energia meccanica per unità di volume, sarebbe sostanzialmente quello che abbiamo definito come lavoro virtuale, lavoro che si manifesta nel momento in cui il materiale smette di essere sotto sforzo




$$U = \int_0^{\varepsilon} \sigma\, d\varepsilon \qquad S.I. = \frac{J}{m^3}$$

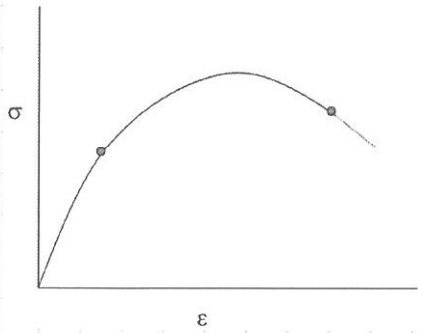
Ricordiamo anche quella che era la legge di Hooke, valida per i materiali IOLE (isotropici, omogenei, lineari e uniformi) :

$$\sigma = \varepsilon E$$

$E$ → Modulo elastico

Nel caso di materiali Hookeani, ovvero nel caso di materiali IOLE il modulo elastico 'E' può essere definito anche come modulo di Young

## Curva sforzo - deformazione




Punti importanti che si possono individuare sulla curva sforzo-deformazione

Limite elastico

Stress a rottura

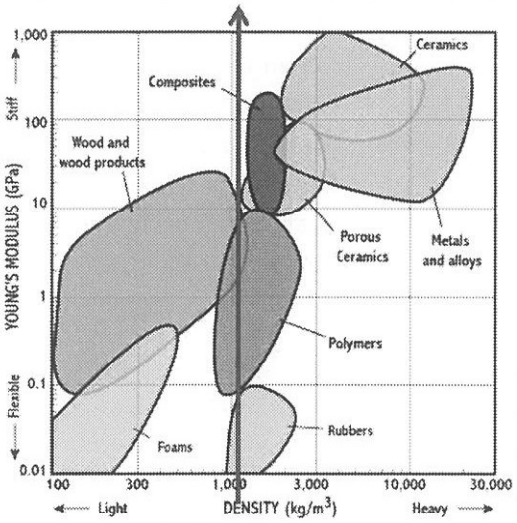
Punto di snnervamento

Zone plastica

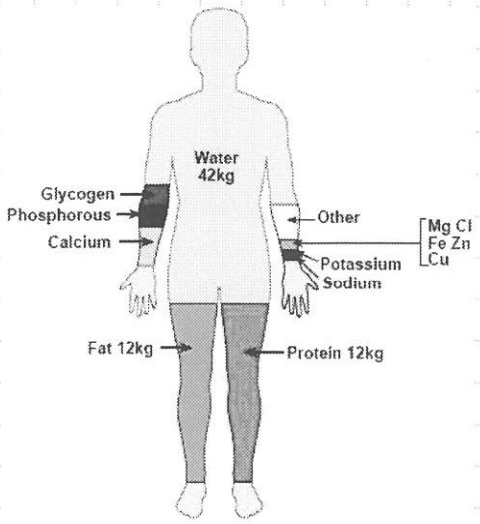
Modulo elastico -> pendenza della curva sforzo-deformazione in corrispondenza dell'andamento lineare

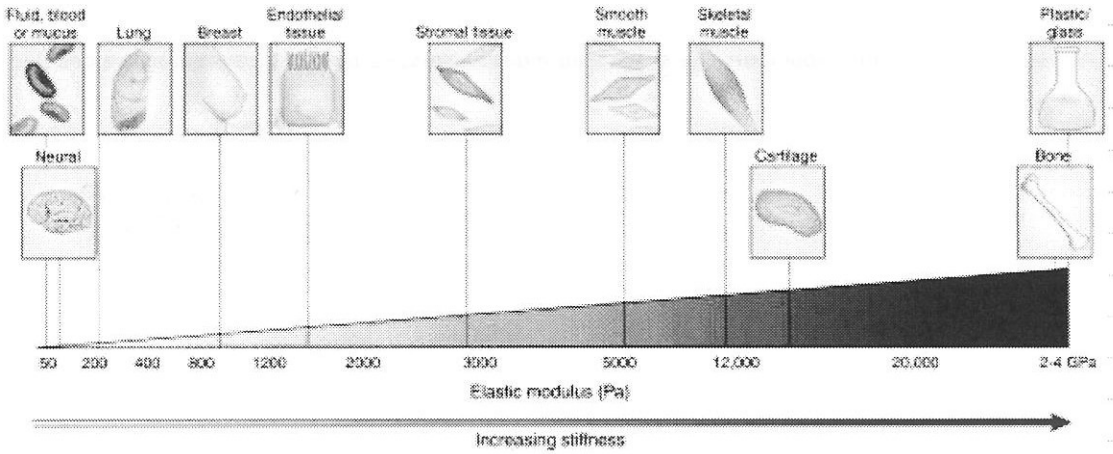
La maggior parte dei materiali biologici non sono IOLE, quindi non possiamo parlare di modulo di Young, in quanto non sono assolutamente lineari, e quindi non sono Hookeani. Parliamo quindi per i materiali biologici del modulo elastico E, che è la pendenza della retta fino ad un particolare punto, in realtà utilizzeremo spesso il modulo tangente o il modulo secante, in quanto i materiali biologici non sono lineari, quindi una volta individuato un particolare punto di lavoro, considereremo come modulo tangente la pendenza della retta tangente il punto di lavoro o come modulo secante la pendenza della retta che passa per l'origine e interseca il punto di lavoro.
I materiali biologici non sono Hookeani

## Asbhy Dog Plot : Densità/Modulo elastico

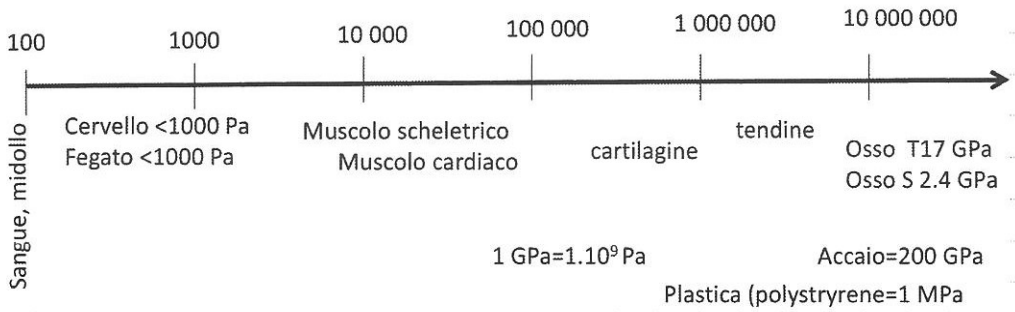



Circa il 70% del nostro corpo è formato da acqua, infatti la densità media del nostro corpo è pari ad 1, in particolare ad 1,09, dipende poi se abbiamo aria nei polmoni o no.
Vediamo che ci sono molti materiali con densità unitaria, ci sono le gomme, i polimeri e i compositi.
Questo grafico mi dice che ci sono tanti materiali che hanno una densità uguale a uno e per ognuno di questi, a seconda di come le molecole sono aggregate tra loro e quali sono le molecole, possono avere un modulo elastico molto molto differente tra loro, ad esempio se prendiamo diversi polimeri vediamo che polimeri differenti tra loro per composizione ma con la stessa densità hanno un modulo elastico molto molto diverso tra loro che va da 0,1GPa a 10GPa.
Le ceramiche porose hanno un modulo elastico simile a quello dell'osso (17GPa), si dice infatti che l'osso sia una ceramica porosa, mentre l'elastina ad esempio è una gomma e ha un modulo elastico di qualche MPa






Nel nostro corpo ci sono tessuti che hanno un modulo elastico pari a 50 Pa, fino ad arrivare a tessuti più rigidi (osso, denti) che hanno un modulo elastico circa pari a 2,4 GPa, ma hanno tutti densità unitaria.
A seconda della funzione dei tessuti abbiamo dei moduli elastici differenti. Il cervello è ad esempio molto molto morbido, è l'unico organo inglobato/impacchettato all'interno di una 'capsula', il cranio, che permette di proteggerlo. Abbiamo poi il tessuto polmonare molto molto morbido, ha un modulo elastico di 400 Pa, così come il seno, ha un modulo elastico di 800 Pa, andando avanti troviamo il muscolo con un modulo elastico di 5MPa, la cartilagine 2MPa, fino ad arrivare all'osso che ha un modulo elastico di 17GPa




Ricordiamo che l'acciaio ha un modulo elastico con un ordine di grandezza superiore rispetto a quello dell'osso. Il modulo elastico dell'acciaio è pari a 200GPa

## TESSUTI CHE HANNO UNA FUNZIONE MECCANICA NEL NOSTRO CORPO

Andiamo a vedere qual è la funzione dei vari tessuti e qual è il loro equivalente meccanico nel mondo della meccanica strutturale e poi andiamo a vedere di cosa sono fatti questi tessuti.
Prima di fare ciò bisogna ricordare le 5 classi di tessuti : epiteliale, nervoso, muscolare, connettivo e un ultimo che si ha difficoltà a classificare che è il tessuto riproduttivo.
**Tessuto muscolare** : tessuto specifico in grado di generare forze, ha un ruolo meccanico molto importante, la parte che dona la meccanicità è quella delle cellule, cellule muscolari, dello scheletro
**Tessuto connettivo** : tessuto che riempie, che troviamo in diverse forme, quali la cartilagine, i vasi, le ossa, il sangue. Il tessuno connettivo per eccellenza è il riempitivo che troviamo nel naso, nelle orecchie e tra la pelle e il resto dei nostri organi. Il tessuto connettivo è costituito da poche cellule e molta matrice extra cellulare (ECM); quindi Istologicamente il tessuto connettivo può essere suddiviso in diversi sottotipi, a seconda delle loro prerogative morfologiche e funzionali, tutti caratterizzati dal fatto di essere costituiti da cellule non addossate le une alle altre, ma disperse in una più o meno abbondante sostanza intercellulare o matrice extracellulare costituita da una componente amorfa e da una componente fibrosa.
**Tessuto nervoso** : tessuto composto da neuroni, e ha la funzione di trasferire impulsi nervosi
**Tessuto epiteliale** : tessuto che riveste l'esterno del nostro corpo, è costituito da strati compatti di cellule con pochissima matrice extracellulare (contrario del tessuto connettivo).
Quanto detto ci serve per capire di cosa sono fatti i tessuti meccanici.

### TESSUTI MECCANICI

**OSSO** : ha la funzione di supporto del nostro corpo ed è un tessuto connettivo, tanta matrice extracellulare, matrice prevalentemente ceramicosa (collagene e idrossiapatite) con poche cellule di qua e di la dai pori.
**TENDINE** : tessuti che si trovano tra osso e muscolo e trasmettono la forza generata dal muscolo all'osso (calcio del pallone), anche il tendine è un tessuto connettivo specializzato
**VASI** : sono dei tubi sostanzialmente che hanno la funzione di contenere (funzione di contenimento è una funzione meccanica) e sono anch'essi costituiti da tessuto connettivo
**CARTILAGINE** : tessuto morbido che si trova tra due ossa e aiuta a ridurre l'attrito quando due ossa sono in contratto, anch'esso è costituito da tessuto connettivo
**LEGAMENTO** : tessuto che vincola il movimento di un arto, ad esempio il ginocchio aiuta a non far uscire la giunzione dal suo 'contenutore', sono una sorta di vincolo cinematico, anch'esso è costituito da tessuto connettivo
**PELLE** : tessuto connettivo, è un organo di contenimento paragonabile ad una parete
L'unico tessuto non connettivo ma che ha un RUOLO MECCANICO MOLTO IMPORTANTE è il TESSUTO MUSCOLARE.

Lo scopo di quanto detto sostanzialmente è quello di comprendere come il tessuto connettivo è un tessuto che riveste un importante ruolo meccanico, bisogna ricordare che il tessuto connettivo è composto da molta matrice extra cellulare e poche cellule, infatti la parte che fa da sostegno meccanico, o gioca un ruolo meccanico, è proprio la matrice extra cellulare oltre e non le cellule; solo nel tessuto muscolare che svolge un'importante ruolo meccanico la meccanicità è conferita dalle cellule muscolari stesse.

Andiamo ora a studiare il tessuto connettivo e la matrice extra cellulare, che è quella che dona le proprietà meccaniche alla maggior parte dei tessuti che andremo a studiare.
L'acqua è una componente importantissima (70% del nostro corpo). Il tessuto connettivo come abbiamo detto contiene un numero ridotto di cellule, che normalmente sono cellule specializzate (fibroblasti = cellule del tessuto connettivo generico) e una grande quantità di matrice extracellulare.
La matrice extra cellulare è molto importante, circonda le cellule, regola il loro funzionamento e ha una struttura molto compatta e ben organizzata.