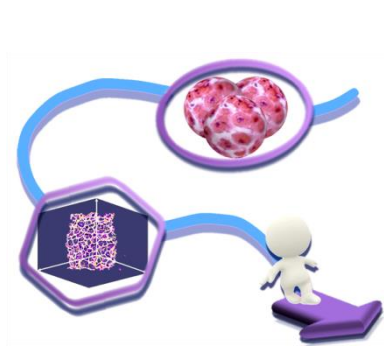


Biomechanics of Soft Tissue

Arti Ahluwalia

Arti.ahluwalia@ing.unipi.it

Address: Centro Interdipartimentale di Ricerca “E.
Piaggio”, Facoltà di Ingegneria



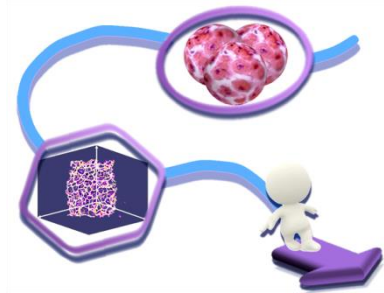
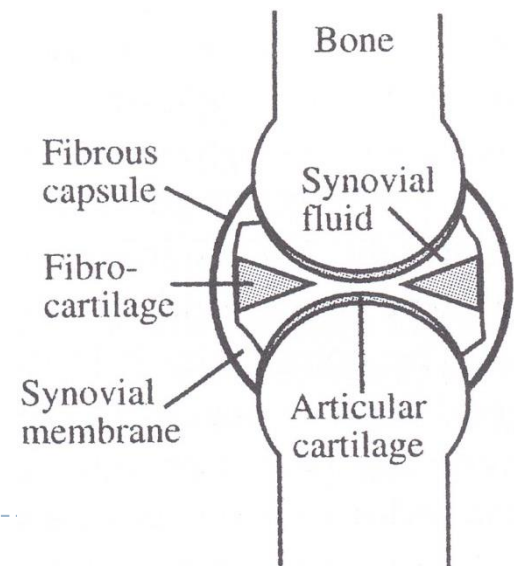
Cartilagine, legamenti & tendini

Cartilagine

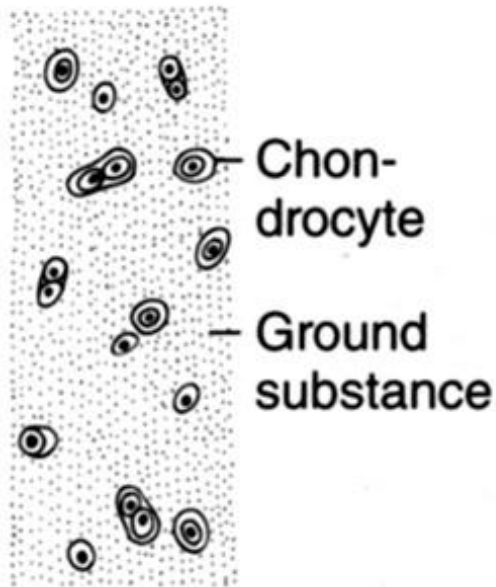
Dal punto di vista meccanico, il più studiato è cartilagine ialina, o articolare. Non è uno smorzatore di sforzi ma una superficie lubrificata che aiuta a diminuire le forze di attrito tra due ossa.

La cartilagine articolare si trova nelle articolazioni sinoviali, che muovono liberamente: ginocchio, spalla, gomito ecc. (*quale sono le articolazioni che non muovono liberamente?*) La sua funzione è di permettere un movimento senza attrito sotto l'azione di uno sforzo: solitamente il peso di una persona. Tipicamente viene soggetto a sforzi da 2-11 MPa.

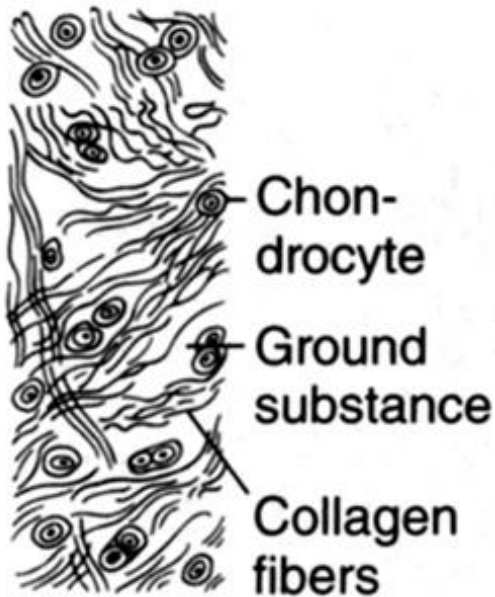
Histologicamente si distingue per la presenza di collagene tipo II, assente in altri tipi di cartilagine.



Cartilage



Hyaline cartilage



Fibrocartilage



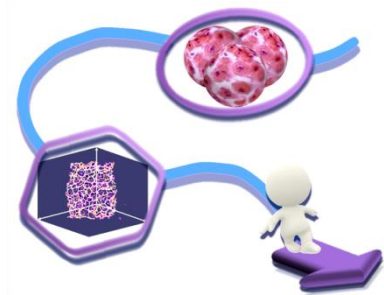
Elastic cartilage

Dischi intervert.

Tendini/osso

lalina cicatrizzato

orecchio



Fibrille sono // alla
superficie

Superficie articolare

Lamina splendens

Zona esterna, 0.3 μm

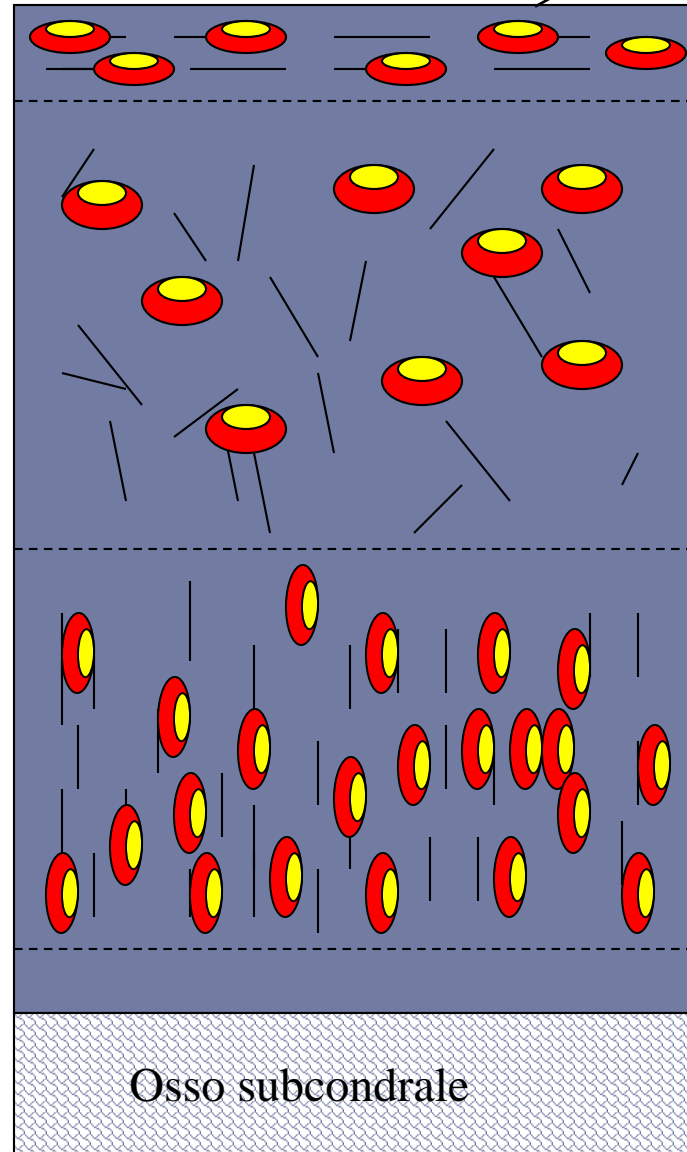
Zona centrale,
80-250 μm

Zona interna (deep),
260- 480 μm

Zona calcificata
(minimizza conc di stress).
Tide mark

Osso subcondrale

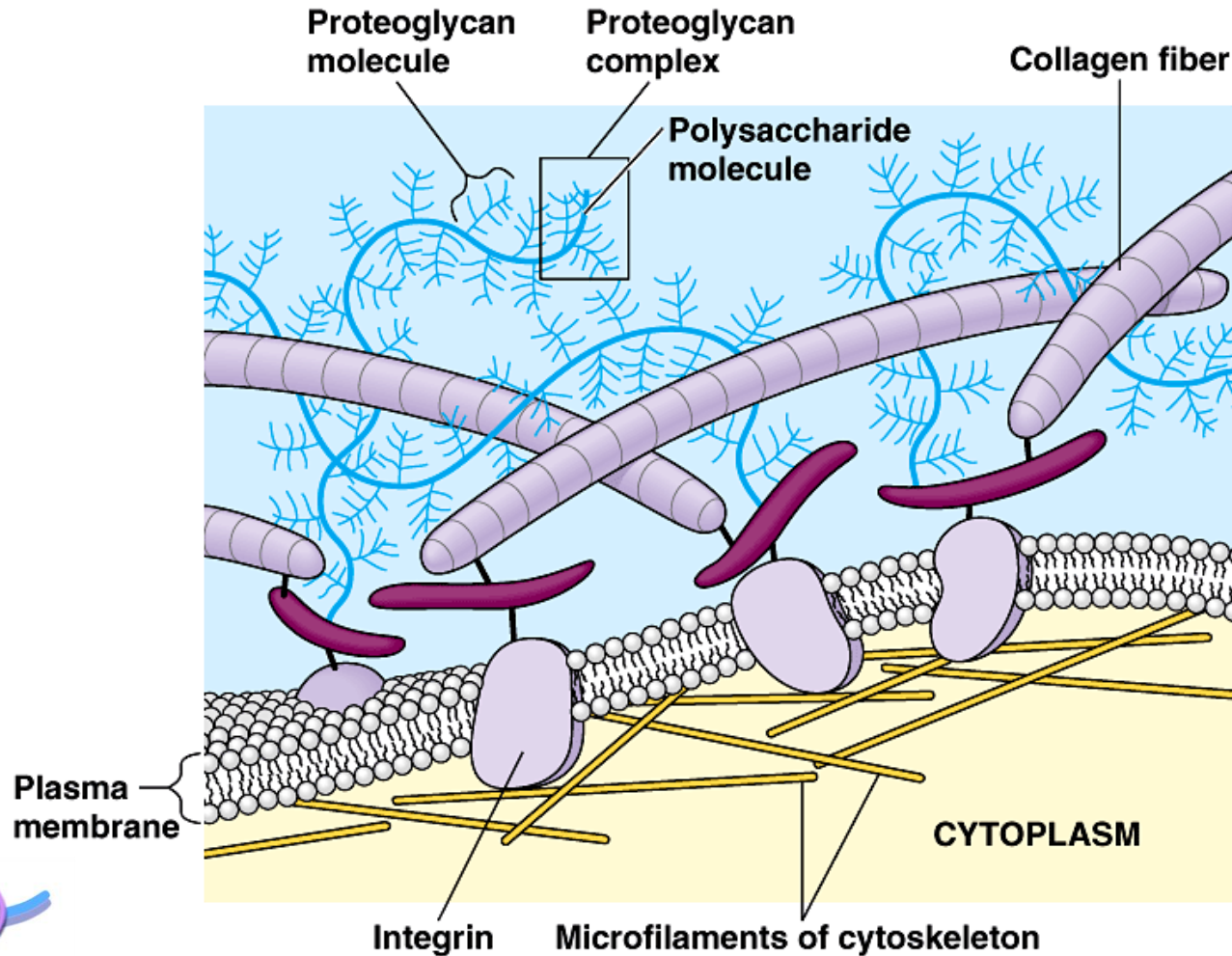
Spessore totale circa 1-2 mm
difficile fare misure



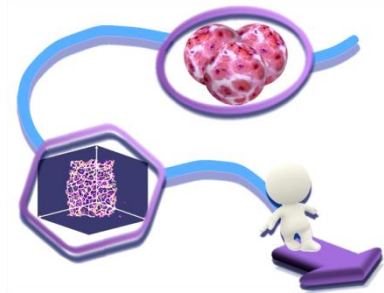
Fibrille sono intrecciate e
⊥ alla superficie

► Spessore totale \approx 1mm (difficile fare prove meccaniche)

La matrice extra cellulare

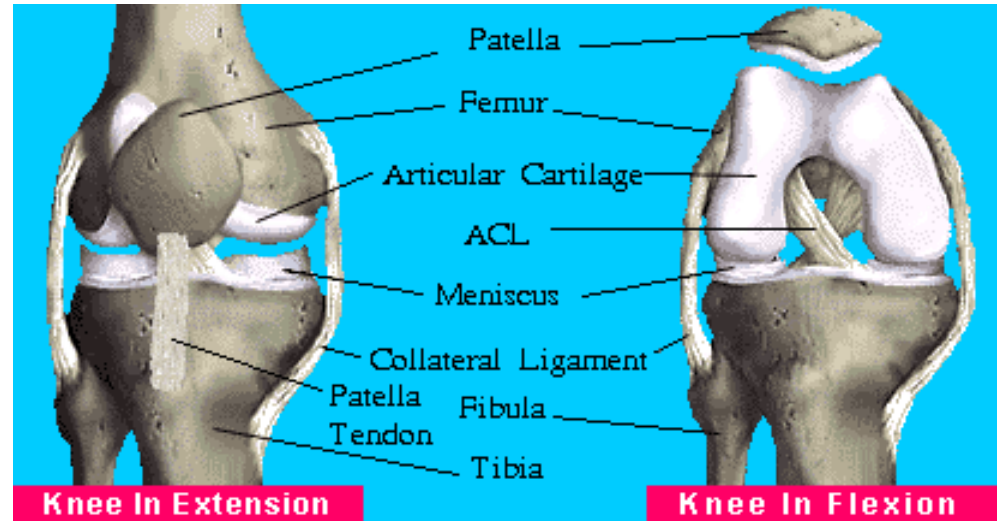
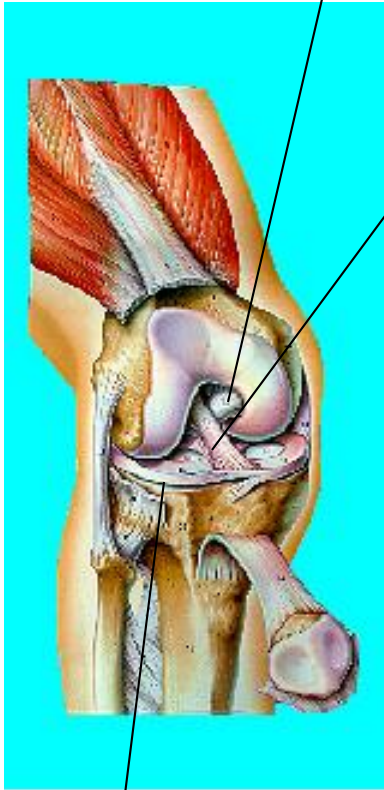


ht © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.



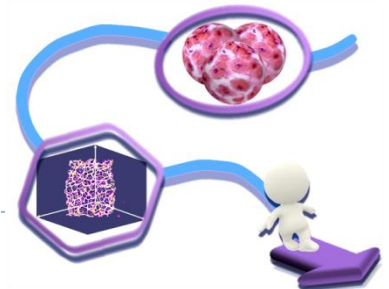
Acl (anterior cruciate ligament)

pcl



Anche il menisco è fatto di cartilagine, ma di fibrocartilagine. La sua funzione è ridurre lo sforzo totale perché aumenta l'area di contatto.

menisco



Proprietà di cartilagine articolare

Alto contenuto di H_2O : 75%. Il resto è collagene (tipo II 15%), e proteoglicani (10%). Il contenuto di PG è alto e la capacità dei PG di attrarre H_2O è fondamentale per il funzionamento della cartilagine. Diverse malattie sono associate con la disfunzione del PG, st la sovrapproduzione di enzimi degradanti (metalloproteinasi),

L'alto valore del modulo compressivo è dato dalla presenza di H_2O .

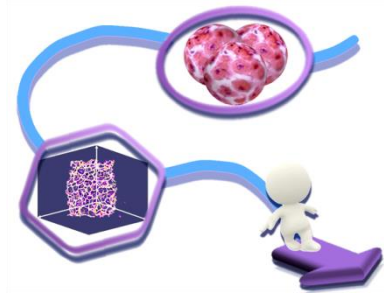
Durante il movimento, o uno sforzo, c'è un (pressione di acqua) movimento di acqua da una parte della matrice **permeabile e porosa** all'altra. Acqua passa dalla zona stressata a quella non-stressata. Quando il sistema è stressato, le catene del PG si repellano. Le forze idrostatiche portano il sistema in uno stato di tensione.

Cellule: condrociti, 3%

Collagene 15%

PG 10%

H_2O 60-80%



Proprietà di cartilagine ialina

Molto viscoelastico: Proprietà meccaniche variano con la velocità dello sforzo applicato. A velocità basse, è basso (1-2 MPa), ma a valori fisiologici (quali sono valori fisiologici?) può essere anche 500 MPa.

Non è uno smorzatore: lo spessore è troppo piccolo per poter ridurre l'impatto di un impulso. Sono le ossa e i muscoli che smorzano.

La cartilagine calcifica con età. Diventa più rigida e meno cedevole. Dovuto a una diminuzione di H_2O .

Le cellule sono condrociti: esprimono collagene (II) e PG che vengono assemblati nella ECM. Sono poche

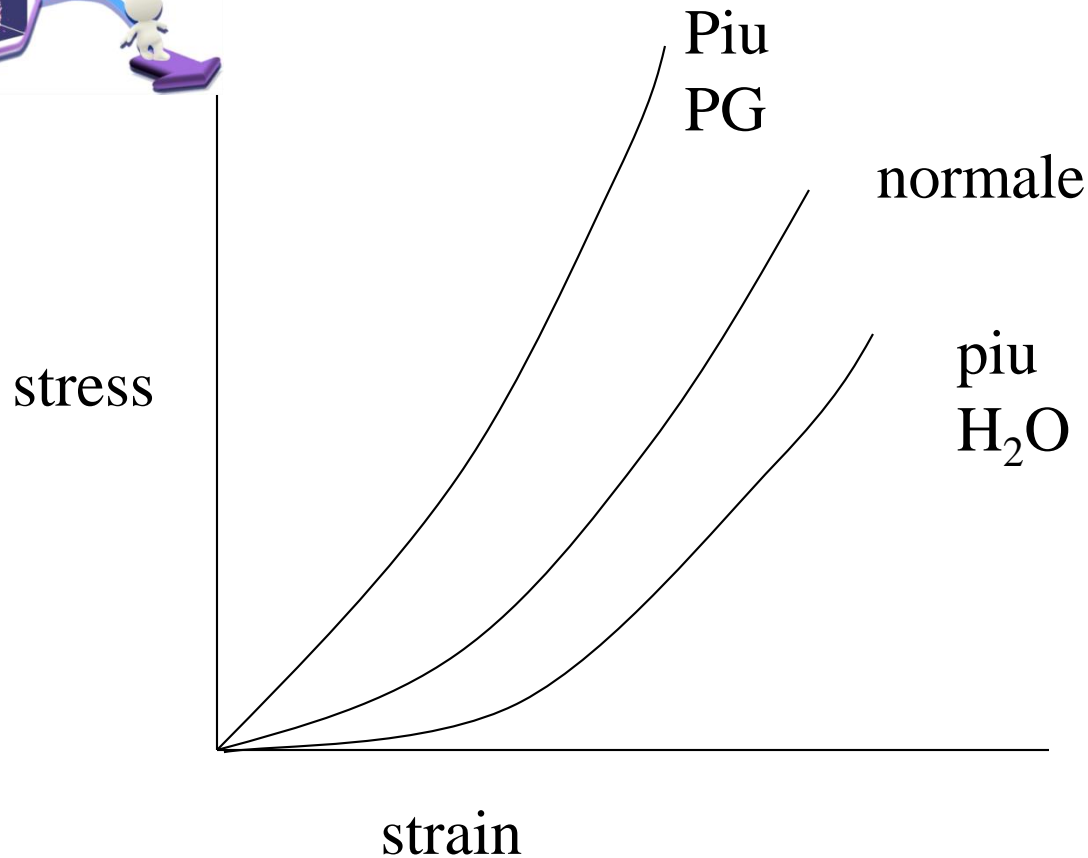
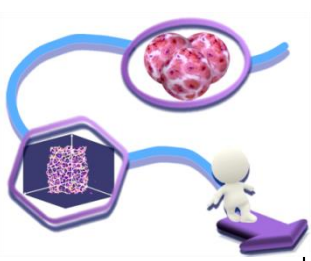
La cartilagine non è vascolarizzata, né innervata. È difficile che si rigeneri

Lo scheletro di un feto è quasi tutto cartilagine, che poi si mineralizza.

È un sistema poroso e bifasico: la frazione di volume di acqua è la porosità

Le proprietà tensili e compressive sono diverse





Cartilagine con età
Diminuisce;
spessore, acqua, PG
Aumenta: collagene

Questo e' il modulo compressivo. Dipende da H₂O e i PG, ma non dal contenuto di collagene (perche?). Sono i PG a determinare la rigidezza del cartilagine



Quando la cartilagine viene deformata, gocce di acqua escono dalla superficie. Questo è dovuto al movimento di acqua. La matrice è elastica, e l'acqua è incompressibile. Quando viene stressato, l'acqua muove attraverso i pori.

Il flusso per unità di area , Q , è dovuto al gradiente di pressione dp/dx .

$$\frac{Q}{A} = v = K \frac{dp}{dx}$$

K è il coefficiente di permeabilità idraulica, che varia con:

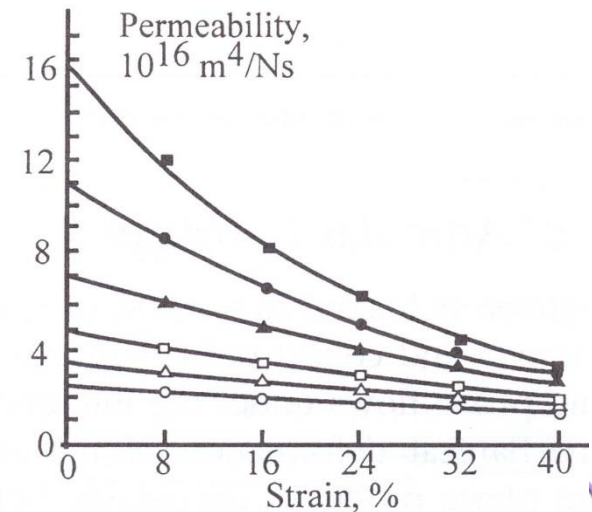
- Zona della matrice (K è minore all'interno del cartilagine)
- Contenuto di acqua
- Deformazione

Valore di K nel carti. umana = $1.18 \cdot 10^{-15} \text{ m}^4/\text{Ns}$

K varia molto. Un equazione empirica per K è

$$K = Ae^{-\alpha \varepsilon}$$

A e α sono costanti che dipendono da P . ε è la deformazione



L. 11.11.11



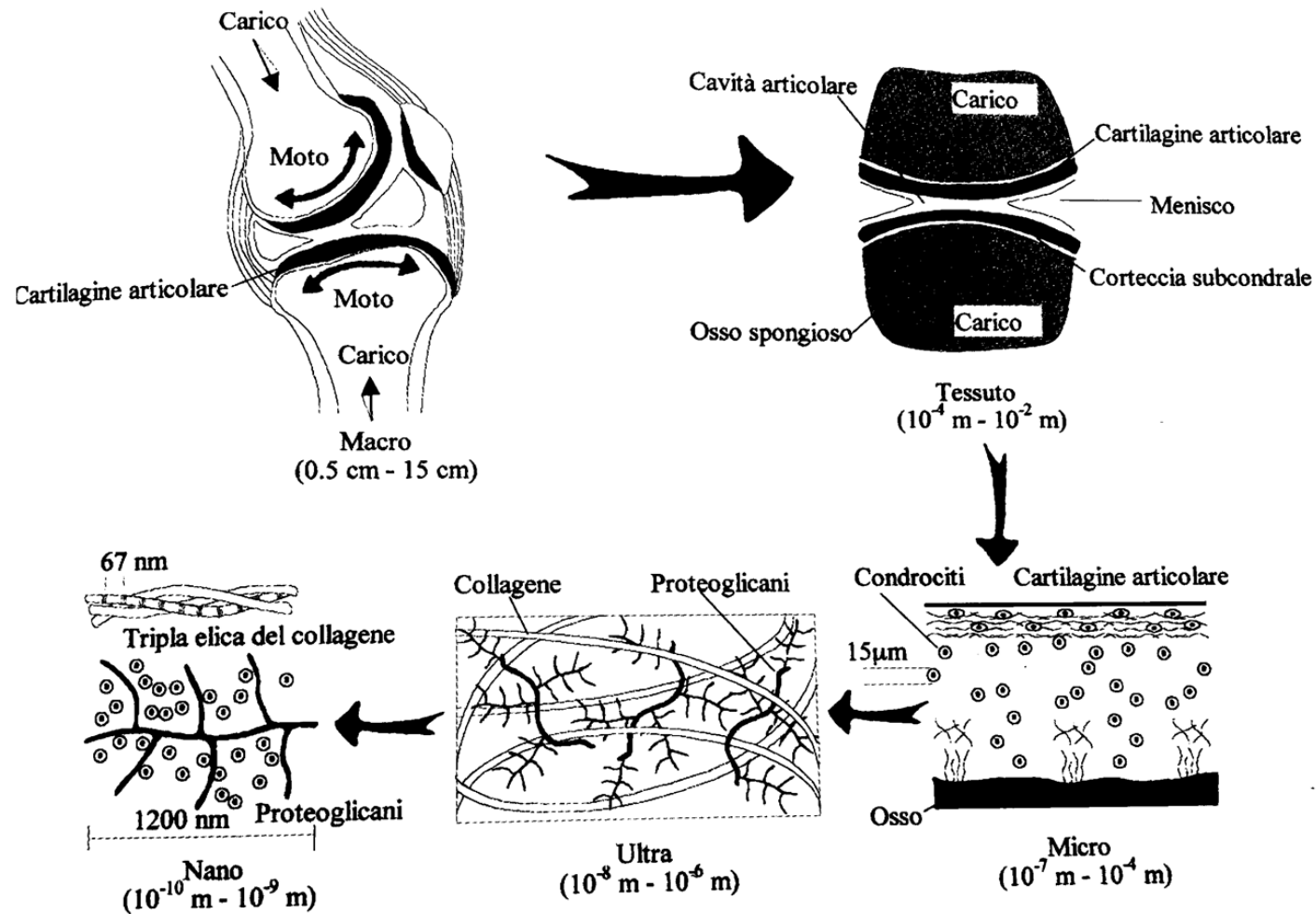
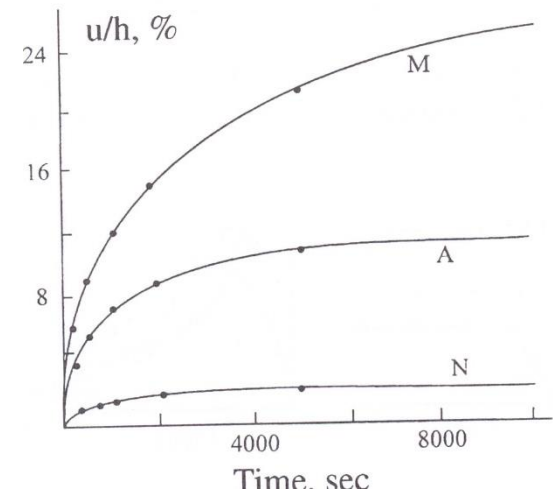
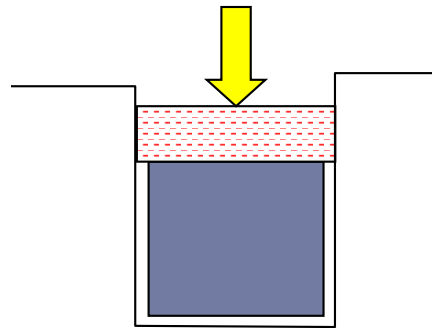
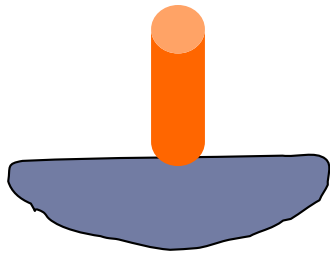


Fig. 2. I componenti di una articolazione distinti per livello gerarchico. (Adattato da Mow et al., 1992).

Il test meccanico più comune è l'indentazione: si applica un carico, poi viene rilasciato e misurato il creep. Per piccole indentazioni, c'è un ricupero istantaneo, poi una fase di ricupero totale lento. Questo succede solo in un bagno di sol fisiologica, non in aria.

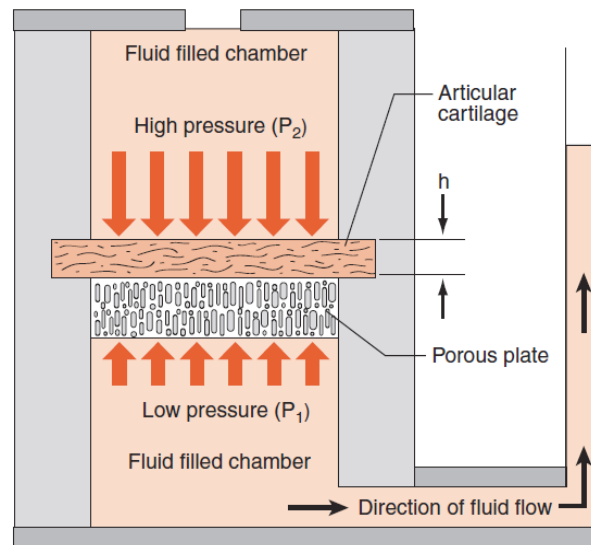
In altri sistemi si usa un pistone con stantuffo poroso, che permette l'entrata e l'uscita di acqua.



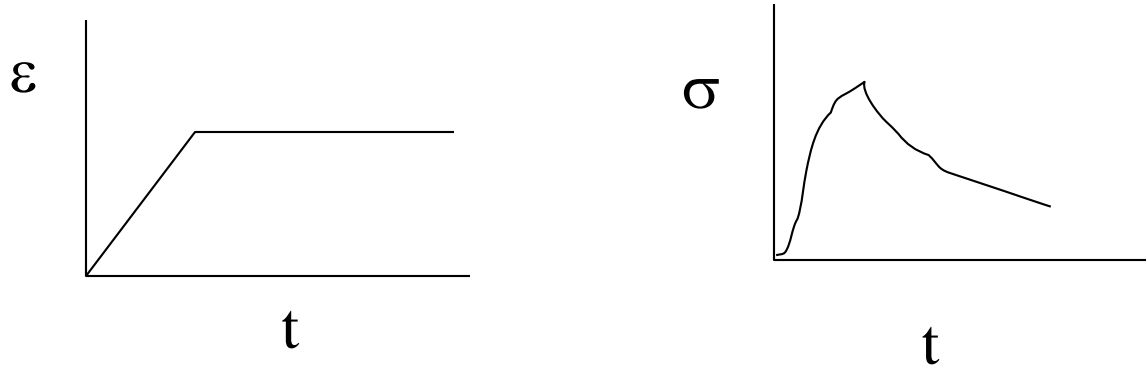
	comp. modulus MPa	K, $10^{-15} \text{ m}^4/\text{Ns}$	H ₂ O%wt
N	5.64	0.49	76
A	0.85	4.67	81
M	0.41	0.81	74

Strain compressivo con tempo per A (cartilagine articolare), M (menisco) e N (cartilagine nasale).

Segue la legge di Darcy



Sotto compressione, la risposta a una deformazione costante è tipica di un materiale viscoelastico



Cartilagine:compartamento tensile

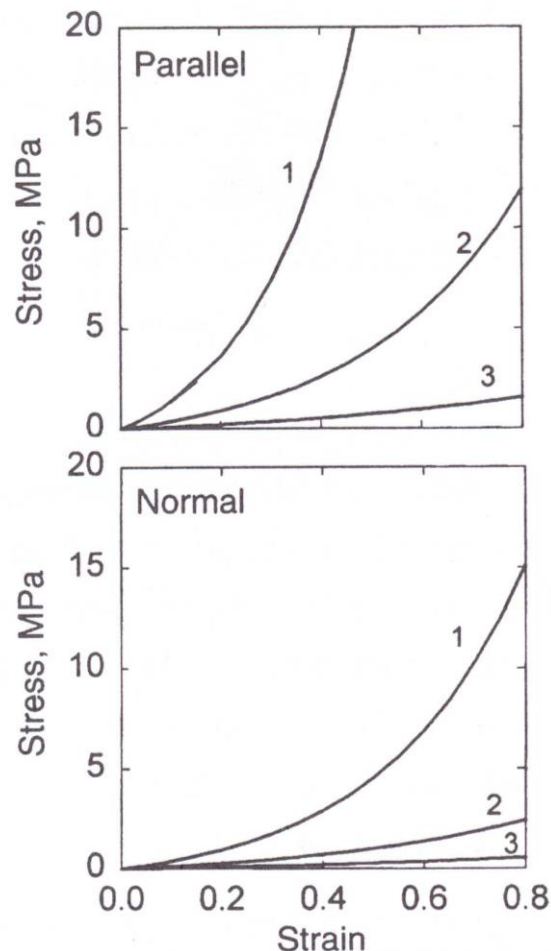
In tensione, sono soprattutto le fibre di cartilagine che supportano cariche. La curva sforzo-deformazione è quella tipica di collagene, con le tre zone (toe- esponenziale, e lineare). Non si arriva a una zona lineare ampia perche le fibre rompono prima di raddirizzare. Un'equazione empirica che descrive il comportamento è

$$\sigma = A(e^{B\varepsilon} - 1)$$

Derivare l'equazione per il modulo elastico

Curve sforzo-deformazione // e perp alla superficie articolare. 1,2,3 sono le profondità, 1 meno profondo. Quindi il modulo è più elevato vicino alla superficie e parallelo (v. Figura).

Modulo elastico (1, parallelo) 23 MPa ,
strain massimo 60-120%, sforzo a rottura 9-18 MPa



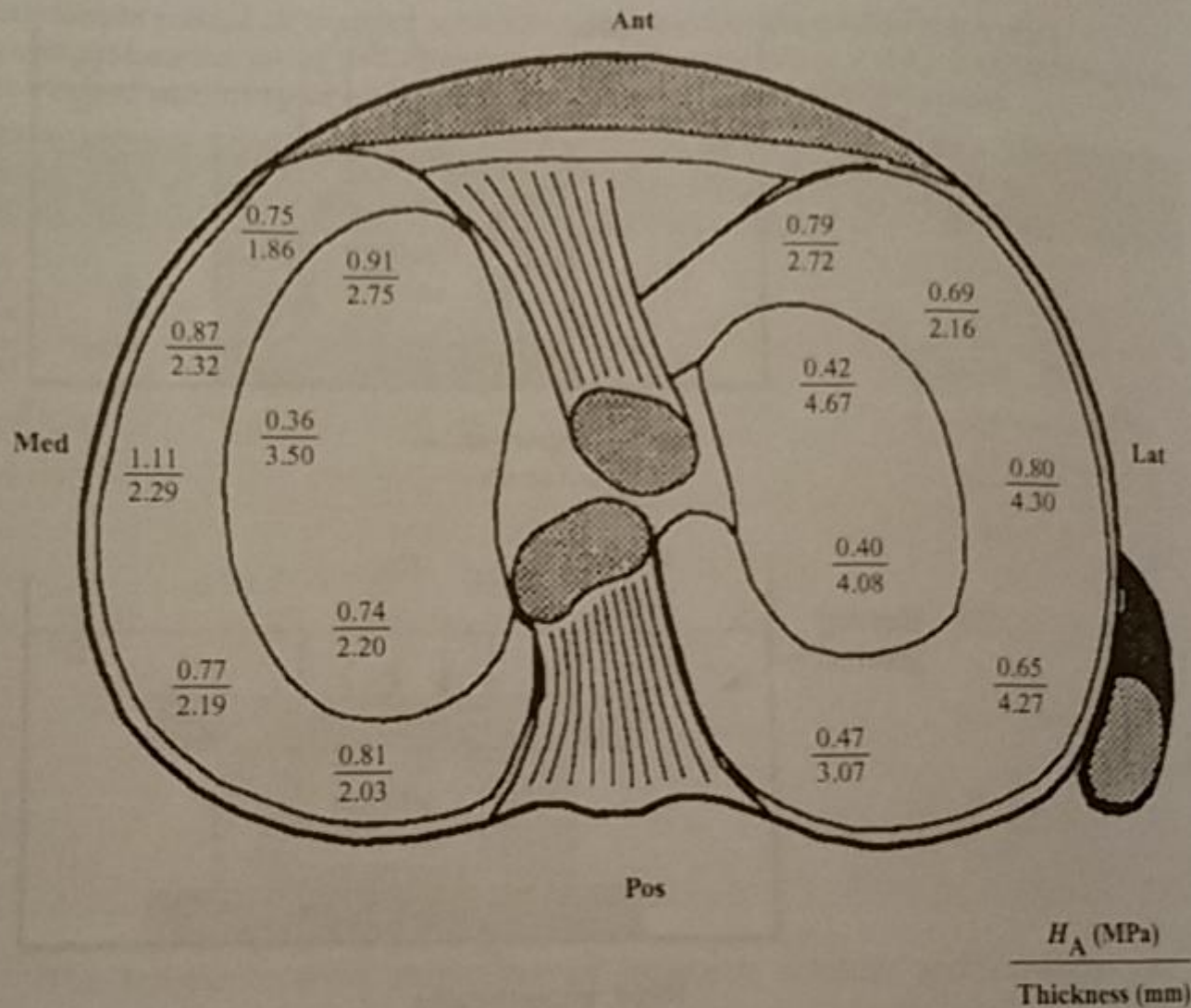
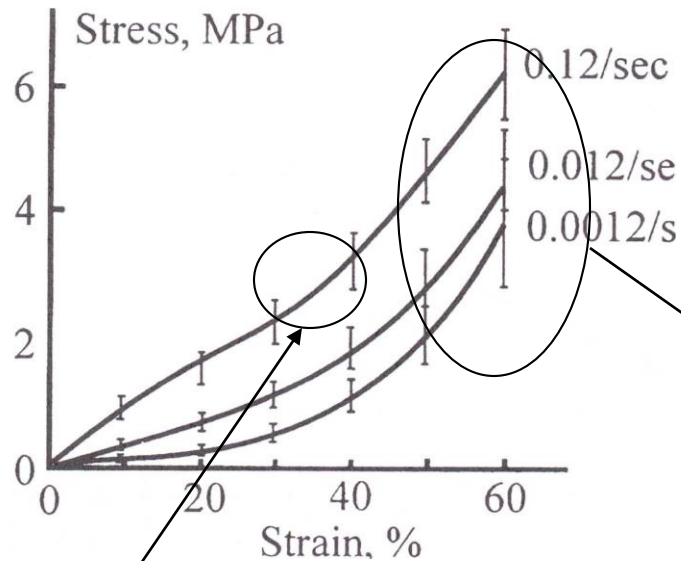


Figure 9.32

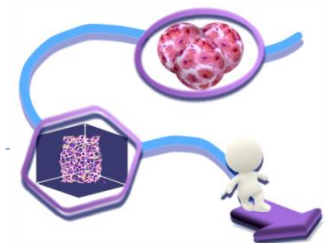
A map of aggregate compressive equilibrium moduli (H_A , the number above the line) and cartilage thickness (the number below the line) measured in the tibial plateau of a normal 21-year-old male. Significant regional differences in both parameters are evident. The tibial plateau is the surface of the tibia (shin bone) that forms the base of the knee joint. Ant, anterior; Pos, posterior; Med, medial; Lat, lateral; see text for definition of H_A . From Mow *et al.* [43] with permission of Lippincott Williams & Wilkins and Dr. Shaw Akizuki.



Effetto di velocità- da confrontare con osso.

A strain elevate, il gradiente è simile

A velocità elevate c'è un'inflessione- dovuto alla resistenza di acqua.



Cartilagine ha un attrito molto basso, circa cento volte minore di olio e metallo.(simile a giacchio su giacchio). Il lubrificante è fluido sinoviale (ricco in proteine e polisaccaridi). Il principale meccanismo di funzionamento è lubrificazione elastoidrodinamica.

μ Cartilagine /fluid sinoviale
(dinamico) 0.005-0.02

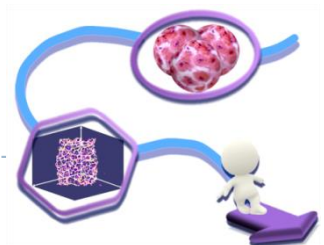
μ giacchio su giacchio 0.02

μ gomma su cemento 1

*La viscosita' del fluido
sinoviale dipende dalle GAG
Invece il coefficiente di
attrito dipende dalle proteine*

Forza di attrito F dipende dalla forza normale N , ma non dall'area di contatto (qui μ è il coefficiente di attrito)

$$F = \mu N$$



Diversi meccanismi di lubrificazione (v. Appunti prof Ciuli)

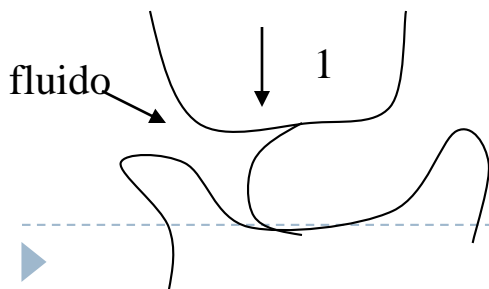
Boundary lubrication: un monostrato di molecole adese su una superficie rugosa

Lubrificazione in superficie: il lub viene assorbito su una superficie rugosa per attenuare la rugosità e ridurre adesione. (fluid film).

Lubrificazione idrostatica: il fluido viene pressurizzato quindi è più efficace

Lubrificazione idrodinamica: il fluido muove (come un idroplano) e appiccica alle superfici. In questo caso, l'attrito è tra le molecole del fluido. Le superfici devono muoversi velocemente per avere sufficiente momento per superare l'inerzia del fluido.

Lubrificazione Elastoidrodinamica : Come sopra ma i due solidi si deformano e il fluido può formare uno strato più spesso.



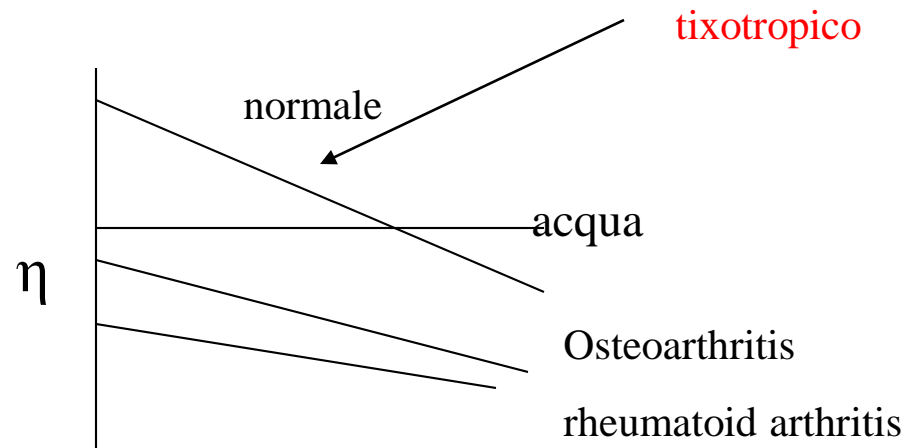
- 1) Si muove superficie 1
- 2) Le molecole del liquido sono appiccate alle pareti. Attraverso la loro viscosità inducono movimento nelle molecole al centro.
- 3) Questo crea una pressione idrodinamica che tende a separare le due superfici.
- 4) Se le superfici sono elastiche si deformano

Malattie della cartilagine: è un problema molto comune, ma le cause non sono ancora chiare. Le proprietà meccaniche cambiano con età e patologie.

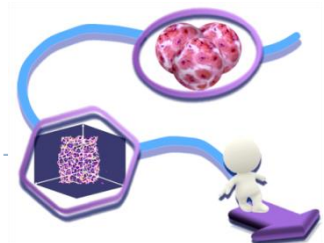
La cartilagine diventa meno duttile, contiene meno acqua, gli enzimi degradano le PG e c'è un eccesso di produzione del collagene.

Cambiano anche le proprietà meccaniche del fluido sinoviale (meno tixotropico con età e malattia).

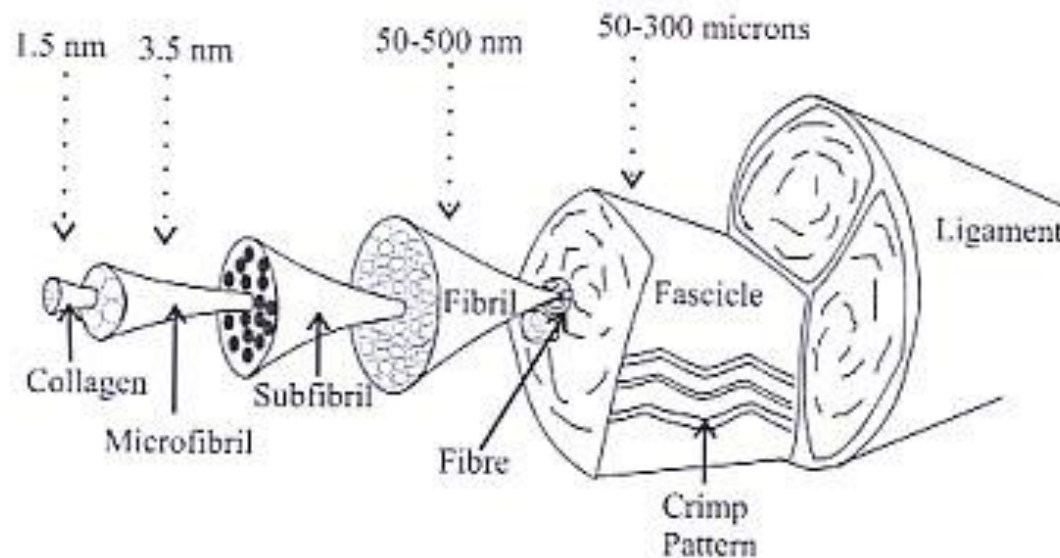
η è la viscosità



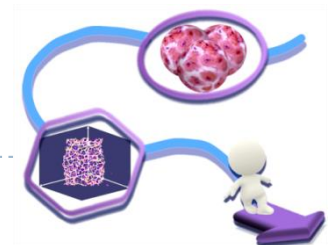
γ , gradiente di
velocità



Legamenti and tendini: sono tessuti altamente specializzati, e variano in composizione e proprietà in diverse zone. Il componente principale è collagene.



Legamento



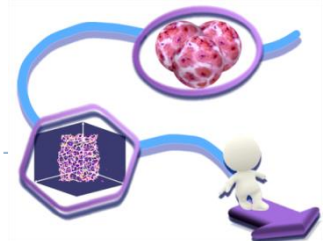
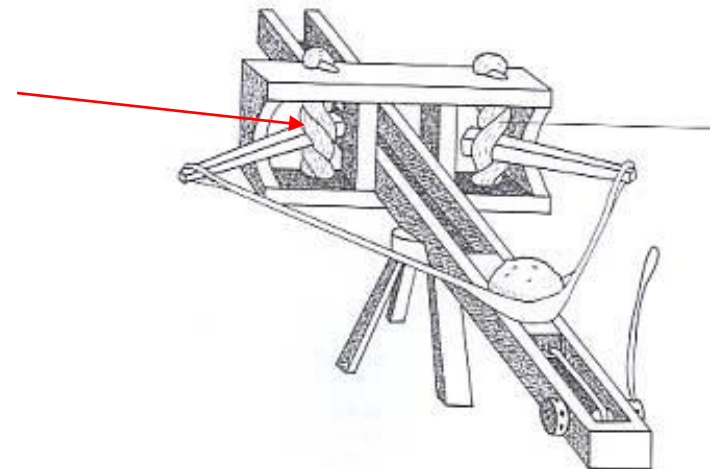
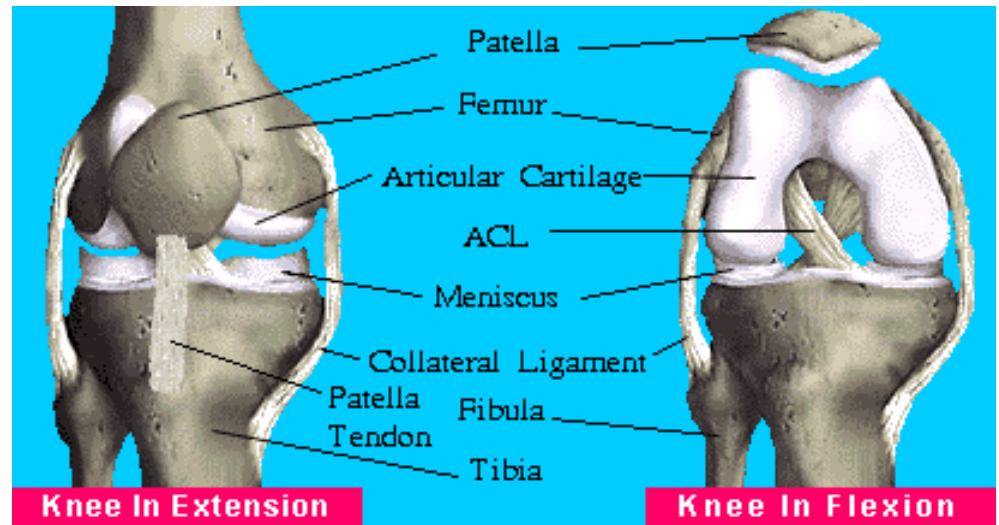
Legamenti: stabilizzazione
passive delle articolazioni.
Originano nell'osso e si
inseriscono nell'osso. Sono
vascolarizzate e innervate.
Hanno anche una funzione
prorocettiva grazie a dei
meccanorecettori sensibili alla
deformazione.

Confrontiamo

Tendine: inseriscono nel muscolo
e osso. Funzione: trasmettere
forze dal muscolo all'osso.

Immagazzinano energia elastica.

Sono innervate, vascolarizzate e
altamente prorocettive.



	% peso secco			
	Legamento	Tendine	Pelle	Cartilagine
Collagene	70-80 (I)	75-85 (I)	56-70 (I)	60(II)
Elastina	10-15	<3	5-10	<3
PG	1-3	1-2	2-4	40
acqua	60-80	65-70		70-85

Legamento: alto contenuto di collagene, poco PG (perche non deve subire forze compressive). Le cellule sono fibroblasti. Produzione di collagen è minore rispetto all'osso. In alcuni legamenti non tutte le fibre sono allineate ma hanno più orientazioni.

Tendine: Tanta collagene , predominante tipo I, meno elastina. Alcuni tendini hanno più PG se sono soggetti a stress compressivi o devono strusciare lungo un osso (vedere spalle). Laddove il tendine striscia contro l'ossa viene encapsulato in una borsa sinoviale. Cellule tenociti sono Fb specializzati.

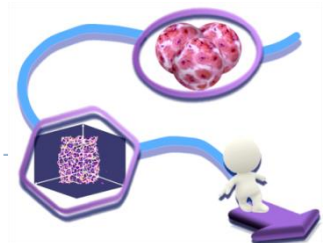
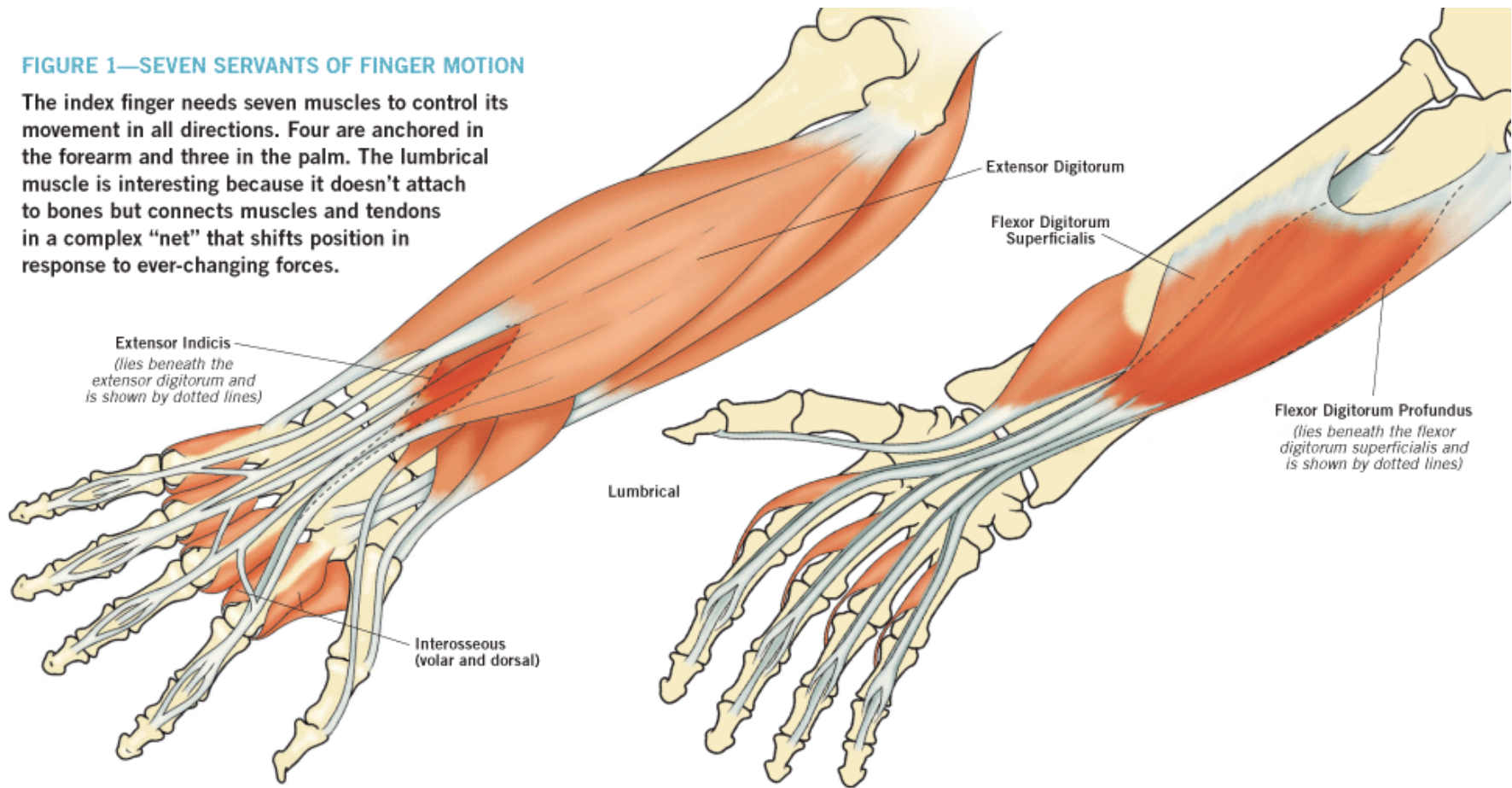
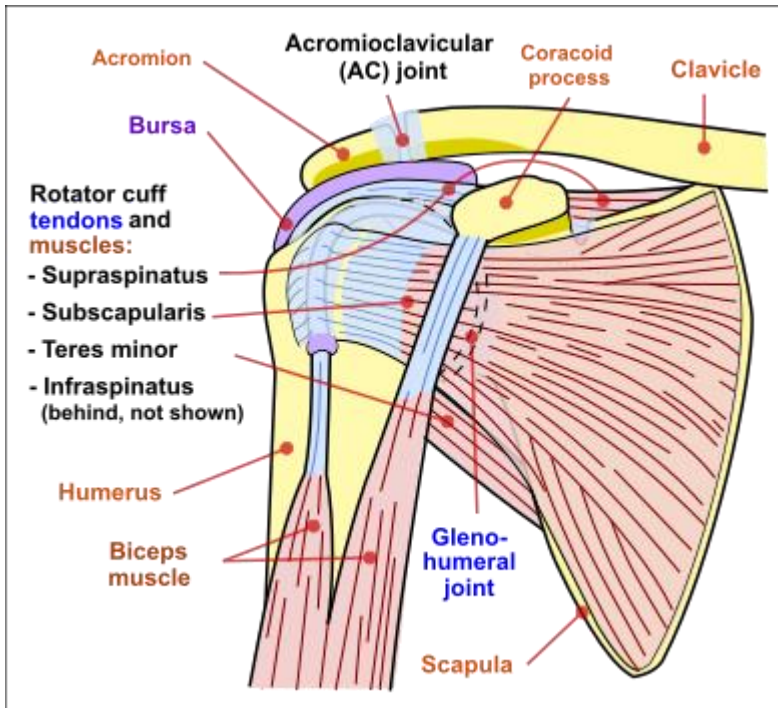


FIGURE 1—SEVEN SERVANTS OF FINGER MOTION

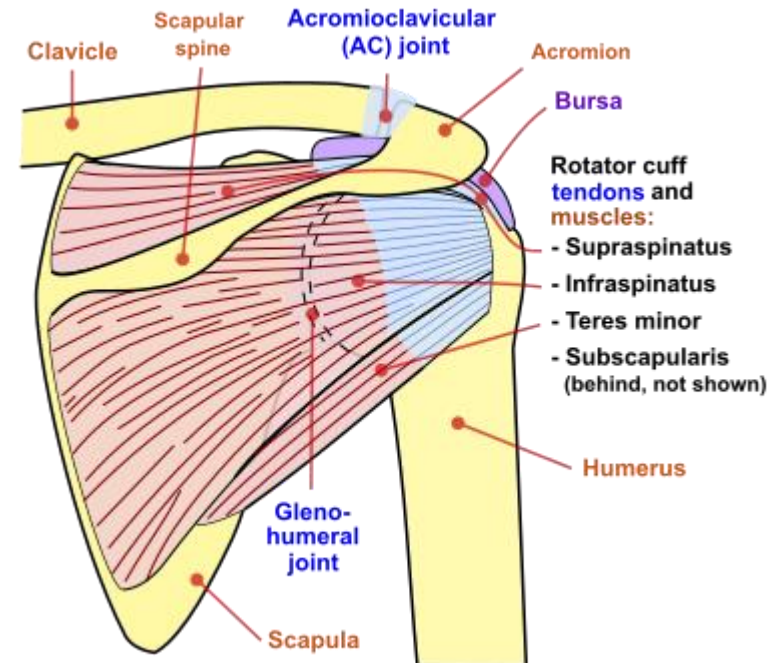
The index finger needs seven muscles to control its movement in all directions. Four are anchored in the forearm and three in the palm. The lumbrical muscle is interesting because it doesn't attach to bones but connects muscles and tendons in a complex "net" that shifts position in response to ever-changing forces.



Muscoli lombricali sono nel palmo. Sono gli unici nel corpo che originano e inseriscono nei tendini



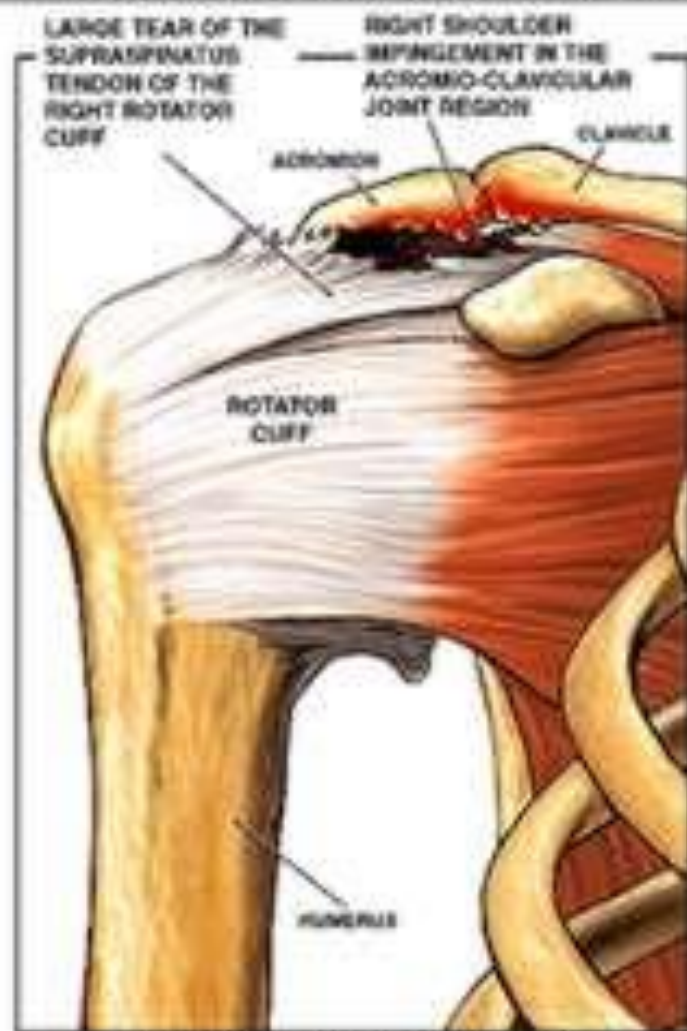
Vista davanti



Da dietro

Cuffia rotatore. Spalla e' molto mobile ma anche molto instabile con pochi legamenti.

RIGHT SHOULDER IMPINGEMENT AND ROTATOR CUFF TEAR WITH SURGICAL REPAIR



PRE-OPERATIVE CONDITION

A. AN INCISION IS MADE INTO THE RIGHT SHOULDER EXPOSING THE ROTATOR CUFF



B. A PORTION OF THE ACROMION PROCESS AND THE CORACO-ACROMIAL LIGAMENT ARE RESECTED



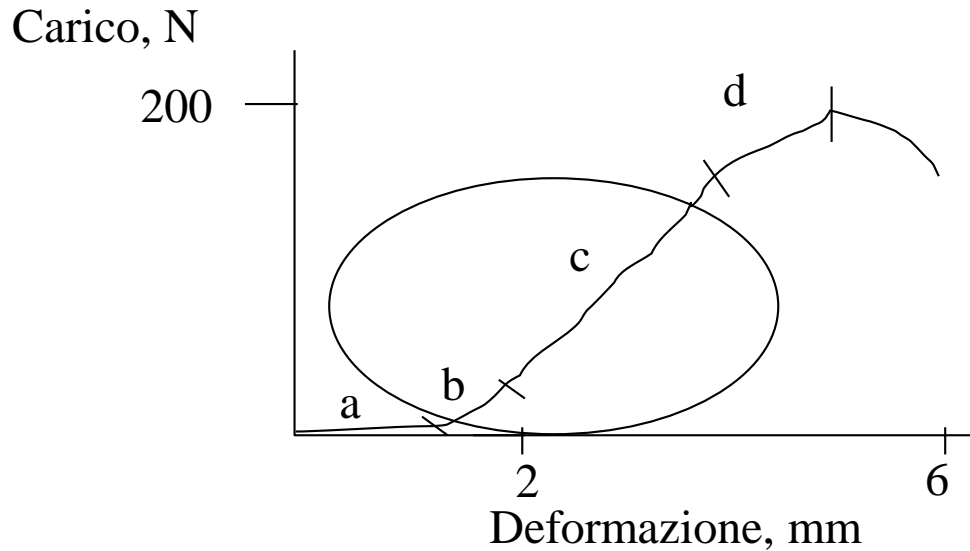
C. A PORTION OF THE CLAVICLE IS ALSO RESECTED TO FURTHER DECOMPRESS THE SHOULDER



D. THE TORN SUPRASPINATUS TENDON OF THE ROTATOR CUFF IS THEN REPAIRED

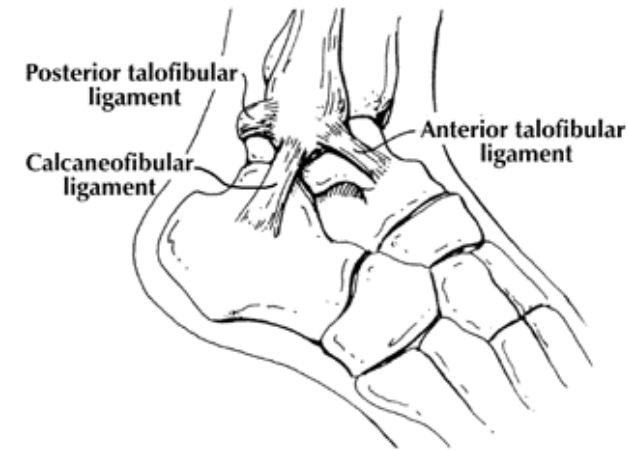


Le proprietà stress-strain sono dominate dal collagene

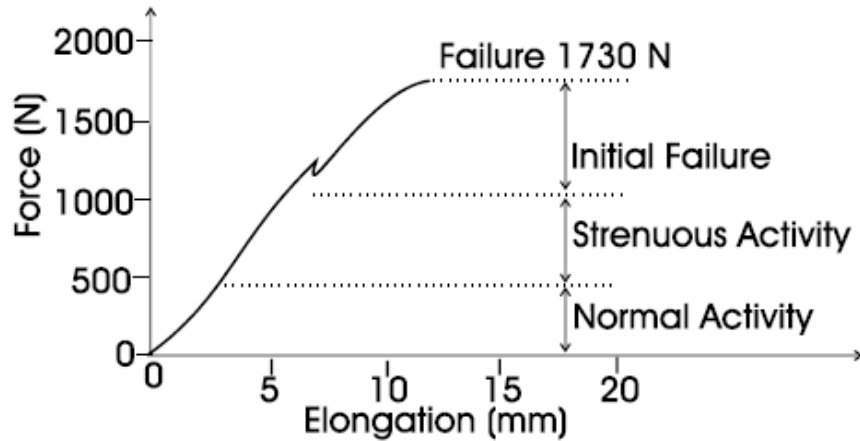


Fallimento: circa 12-15% deformazione

Caviglia Storta:
legamento della caviglia
viene deformato oltre i
limiti elastici o subisce
una torsione e si strappa.



In vivo tutti i tessuti sono prestressati. Le curve in vitro non rappresentano le proprietà stress strain da una posizione di riposo in vivo, ma da una posizione di strain zero. ** Possiamo supporre che le curve sono shiftate a destra.

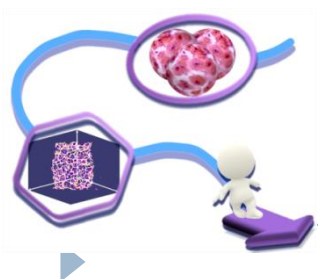
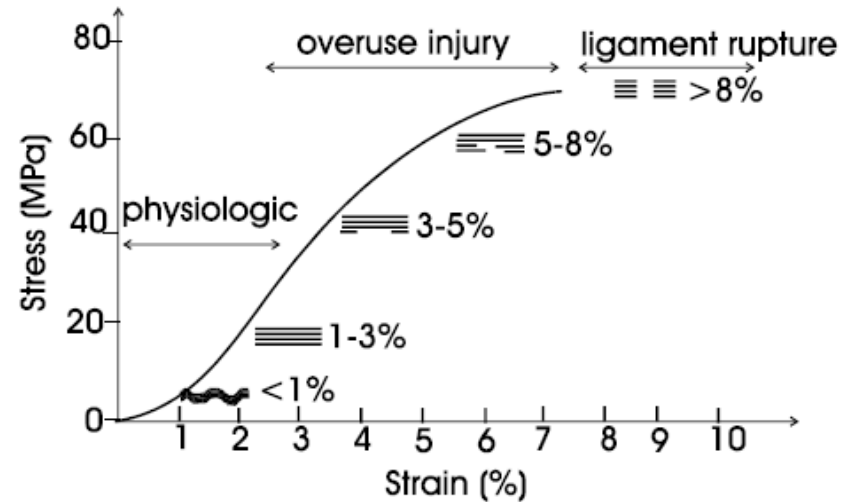


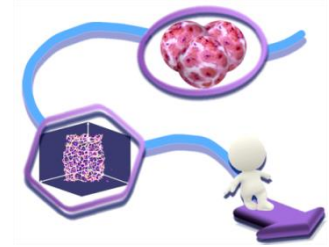
Curva ipotetica di forza-allungamento per il complesso ACL-osso.

Attività normale: sforzi meno del 25% massimo.

Attività intensa: corsa veloce, si può entrare nella zona 3, danno isolato alle fibre.

Rapporto tra deformazione e reclutamento fibre.





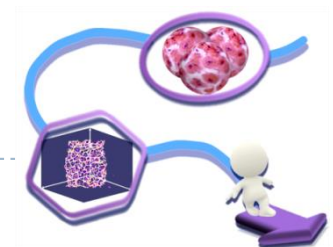
Proprieta Meccaniche in tensione

	Legamento	Tendine	Cartilagine	Osso
Mod Elastico	1 GPa	2 GPa	<500 MPa (t)	15GPa
Deform. Rottura	10-15%	less	60-120% (t)	3%
Sforzo a Rottura	50 MPa	150 MPa	low	>150 MPa

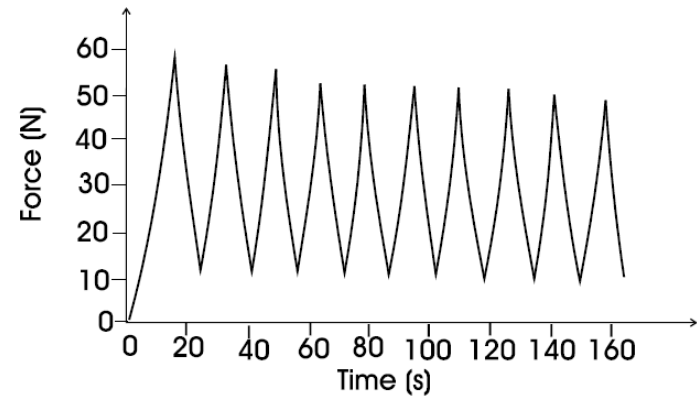
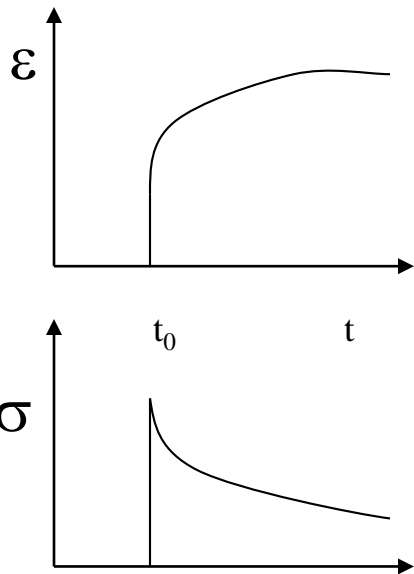
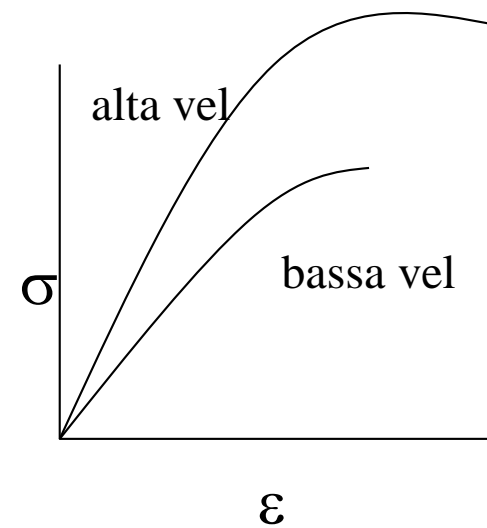
	% peso secco			
	Legamento	Tendine	Pelle	Cartilagine
Collagene	70-80 (I)	75-85 (I)	56-70 (I)	60(II)
Elastina	10-15	<3	5-10	>3
PG	1-3	1-2	2-4	40
acqua	60-80	65-70		70-85



Tissue, human	Location	Tensile Modulus MPa
Tendon	Achilles	819
Tendon	Patellar	643
Ligament	Cruciate	345
Ligament	Flavum, young	98
Ligament	Flavum, old	20
Cartilage	HWA fc surface	5
Cartilage	HWA fc middle	3
Cartilage	LWA fc surface	10
Cartilage	LWA fc middle	5

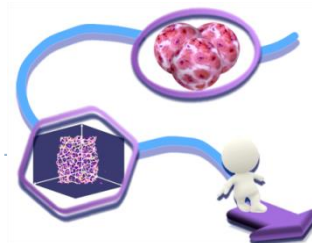


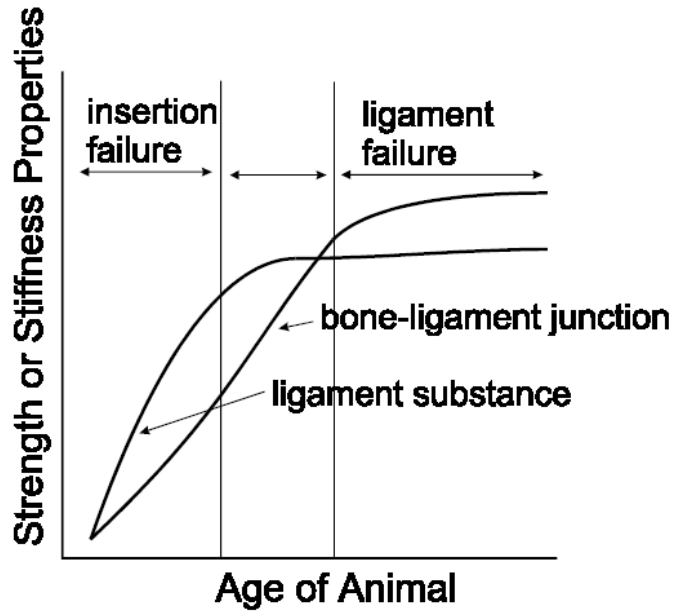
Legamenti e tendini mostrano un tipico comportamento viscoelastico: stress relaxation, creep, isteresi e preconditionamento. Il comportamento è sempre come il modello SLS, ma non si può dire a cosa attribuire i parametri.



Risposta tipica a carico e scarico ciclico.

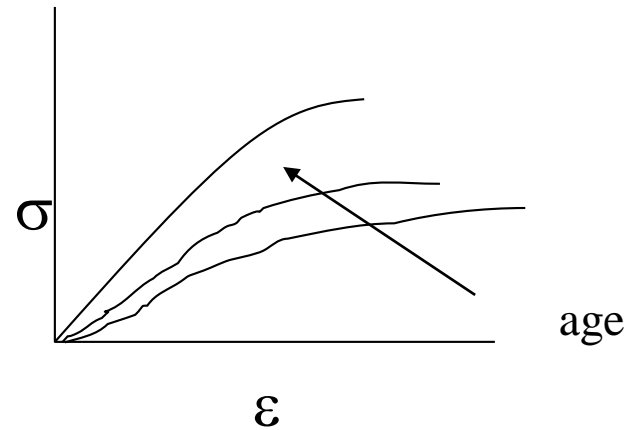
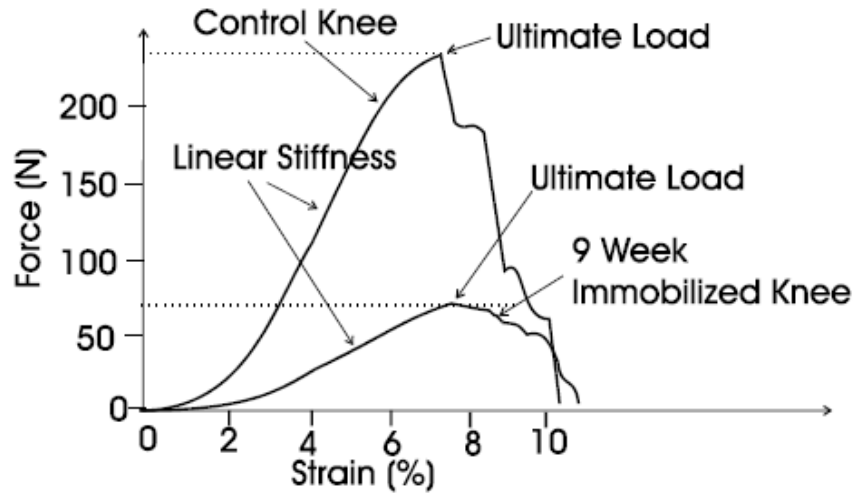
Il legamento “ammorbidisce”



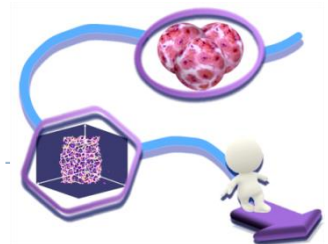


Età e immobilizzazione:

Divento piu rigide e meno plastiche e assorbono meno energia.



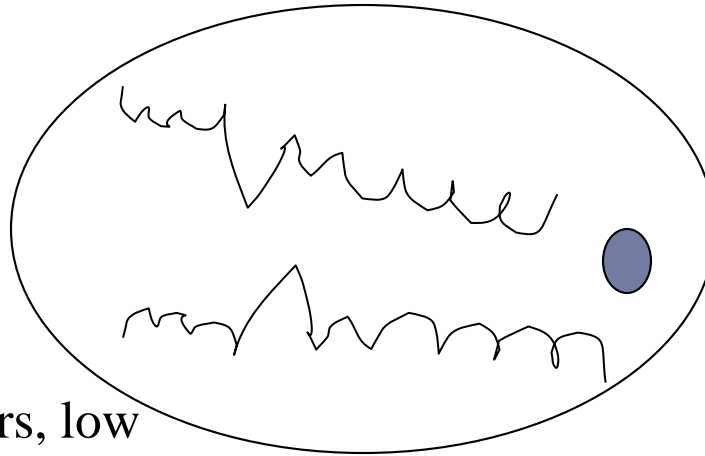
Coniglio
immobilizzato



Keep in mind moments when discussing tendon and muscle function.



Canines, incisors, low force, high velocity



Molars, large force, low velocity

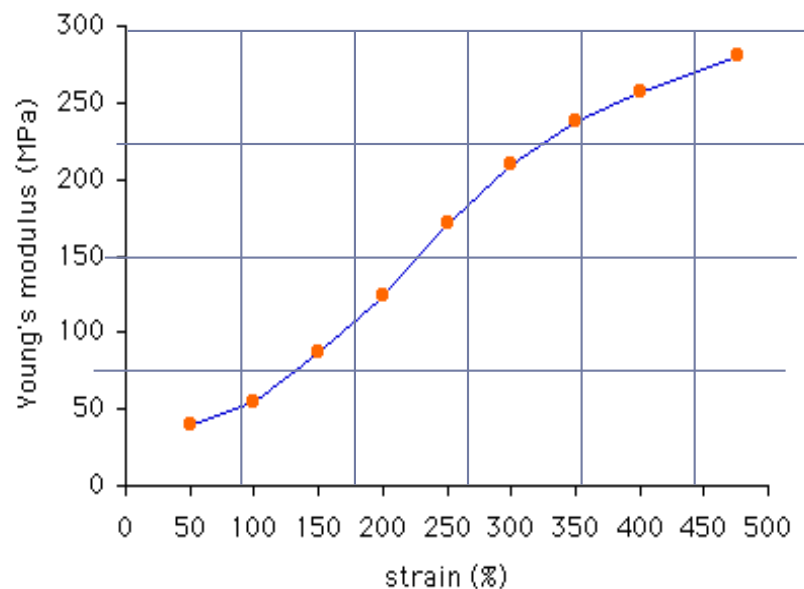
Tendine spessi e corti sono più rigidi (ad esempio nelle gambe), producono molta forza e energia. In contrasto, tendini lunghi e sottili sono più deformabili e hanno alta precisione e range ma poca forza (nelle dita).

Esercizi

1. “La funzione della cartilagine è di assorbire forze”. Verifichiamo questo. Supponiamo uno strato di 2 mm di cartilagine in contatto con 300 mm di ossa. La superficie di cartilagine viene caricata con una forza F . Se i due tessuti hanno un modulo elastico di 500 MPa & 1000 MPa rispettivamente, calcolare la frazione di energia contenuta in ogni tessuto.
2. E' stato postulato che riscaldamento eccessivo del tendine puo causare danno del tessuto nei atleti. Supponiamo un tipico tendine con un modulo elastico di 1 GPa che si deforma da 0.5% a 2% durante una corsa. Se il rapporto stress-strain è lineare, quanta energia viene rilasciata durante ogni ciclo? Se il calore specifico del tendine è uguale a quella del acqua, che percentuale del calore deve essere dissipata per aumentare la temperatura da 1°C in 1000 cicli? Assumiamo che il calore non viene dispersa (è ragionevole?). Danno a causa del calore è plausibile?



3. Nella figura è riportato la curva del modulo elastico vs. deformazione per un filo di diametro $10\text{ }\mu\text{m}$ e lunghezza 20 cm di seta della ragnatela. a) Tracciare il diagramma sforzo deformazione. b) Dalle curve stimare il peso massimo di un insetto che riesce a essere intrappolato sul filo senza romperlo. c) considerare adesso un insetto che vola con una velocità di 10 km/ora . Che peso (minimo) deve avere per rompere il filo mentre vola?



4. Un tessuto biologico di sezione 1.2 cm^2 e spessore 15 mm viene soggetto ad una prova meccanica. La tabella riporta il dataset raccolto durante l'esperimento. Dalla tabella dire i) di che tipo di prova si tratta, ii) che tipo di modello può essere usato per rappresentare il tessuto, iii) calcolare le costanti dei parametri elastici/viscoelastici del modello.

Time (s)	Length (cm)	Weight (g)
0	1.5	72
5	1.9179	72
10	2.2775	72
20	2.8536	72
50	3.8306	72
80	4.2278	72
100	4.3506	72
200	4.5	72



5. Consideriamo il salto in alto. Se supponiamo che è l'energia elastica è tutto immagazzinato nel tendine di Achilles per effettuare il salto, quanto sarebbe il limite massimo del salto?

Dati

Peso persona 50 kg

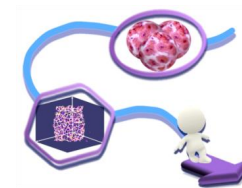
Tendine 1.5 cm diametro, lungo 35 cm

Modulo elastico 1 GPa

Deformazione 2%



E' il tendine piu' grande



6) Nella figura, è riportato un modello a parametri concentrati di un legamento.

- i) Che tipo di risposta stress relaxation e creep ha il modello?
- ii) Disegnare le risposte al creep e stress
- iii) Quali sono i valori di sforzo e deformazione a $t=0$ e $t \rightarrow \infty$?

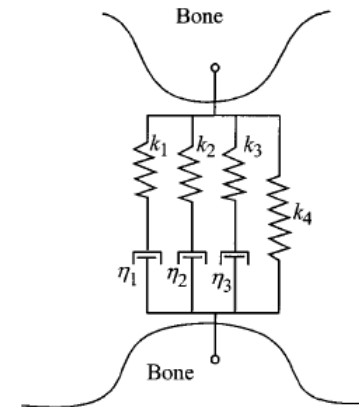


Fig. 2 Spring-dashpot model of an ankle ligament

7) Calcolare il modulo elastico della pelle addominale nelle due direzioni, spiegando perché sono diverse.

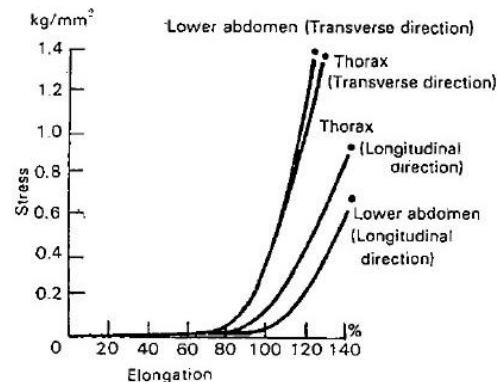


FIG. 199. Stress-strain curves in tension of the skin of persons 20 to 29 years of age.

Domande

8. Per deformare un pezzo di aorta da 2 a 2.3 cm, ci vuole uno stress di 1MPa . Dopo un ora nella stessa posizione deformata, lo stress è. 0.75 MPa.

Quale il tempo caratteristico del sistema, assumendo che sia di tipo Maxwell?
Qualè lo sforzo esercitato dopo 5 ore?

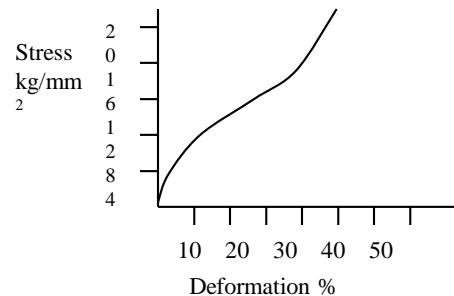
9. A polyethylene sample is deformed by 20%. Later the load is removed, the sample recovers 50% of its deformation after 1 hour at room temperature.

Assuming a Voigt model, what is the charcteristic relaxation time?

How much of this deformation does it recover after 5 hours?



11. Questo è una curva sforzo deformazione del capello



Calcolare il modulo elastico e confrontare con elastina e collagene. Che molecole è e come è la sua struttura molecolare?

12. Una persona di 60 kg trasmette 2 volte suo peso alle ginocchia mentre corre (perché?). Questa forza è distribuita sulla cartilagine. Quando cade, l'area di contatto cambia da 15 cm^2 a 0.5 cm^2 . Calcolare lo stress, la deformazione e l'energia di deformazione nei due casi. La forza rimane uguale. Lo spesso della cartilagine è 5mm ed è linearmente elastico con un modulo di 100 MPa.