

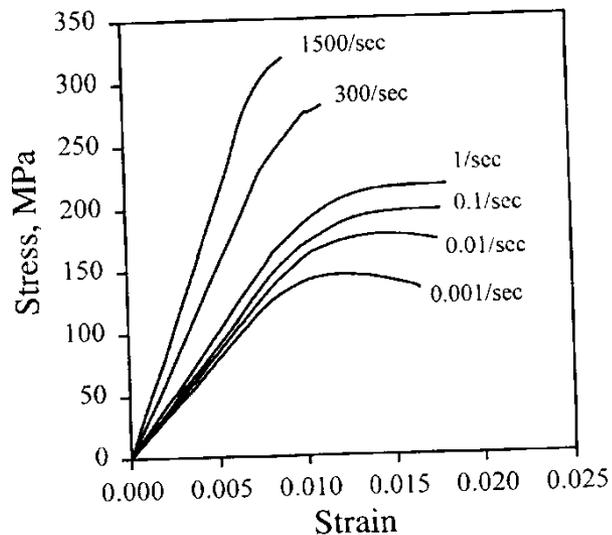
# Biomechanics of Soft Tissue

Arti Ahluwalia

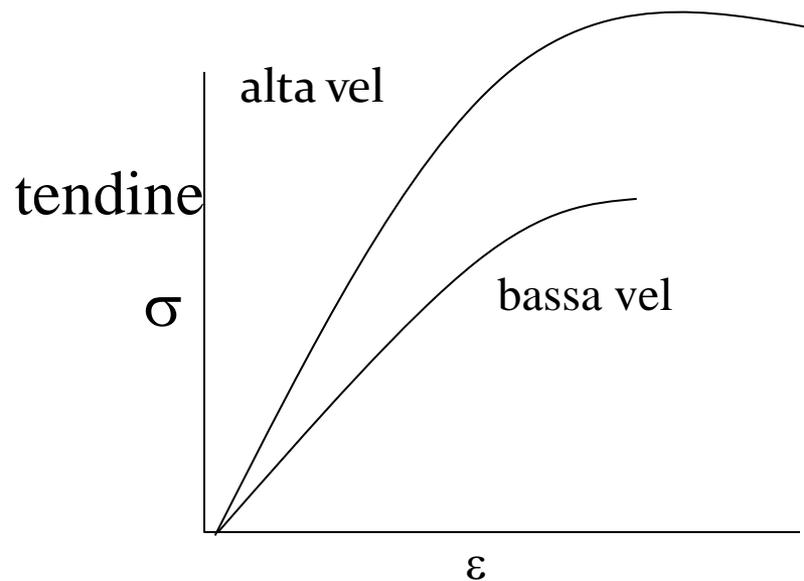
**Arti.ahluwalia@ing.unipi.it**

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

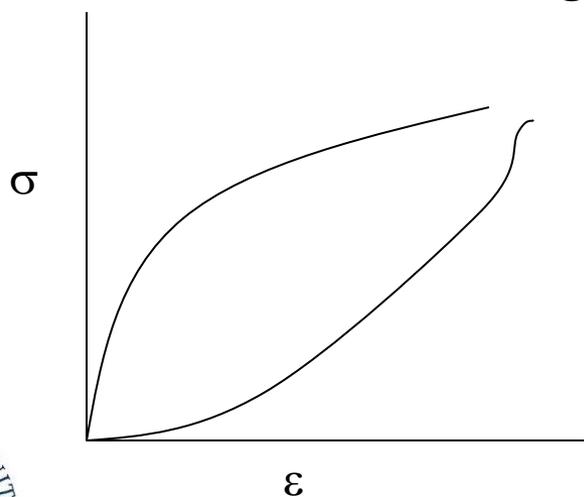




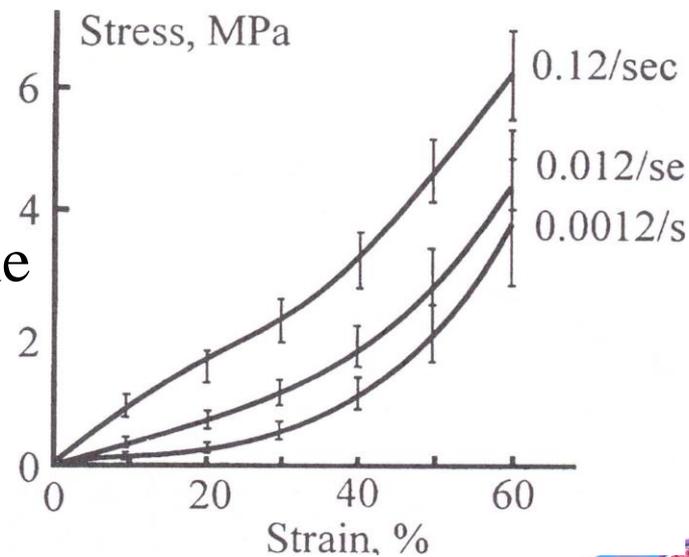
OSSO



*Stessa area, diverso l'energia*



cartilagine



*Quale è piu forte?*

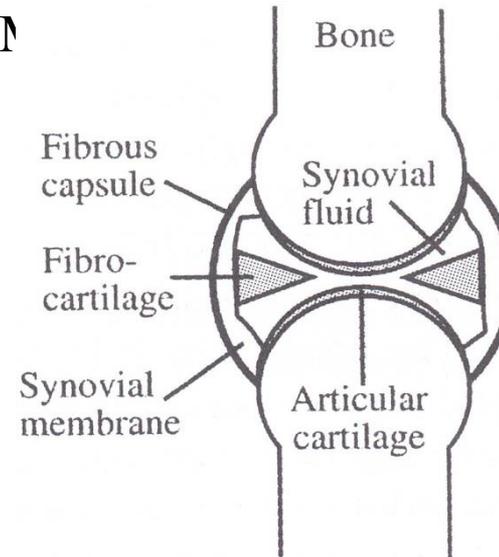
# Cartilaginee, ligamenti & tendini

## Cartilagine

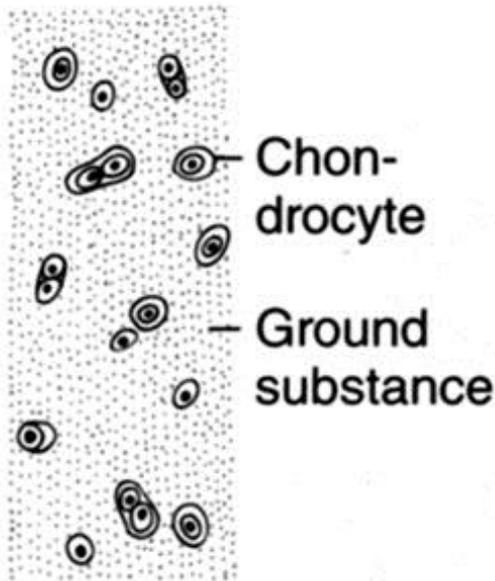
Dal punto di vista meccanico, il più studiato è cartilagine ialina, o articolare. Non è uno smorzatore di sforzi ma una superficie lubrificata che aiuta a diminuire le forze di attrito tra due ossa.

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 sogetto a sforzi da 2-11 N

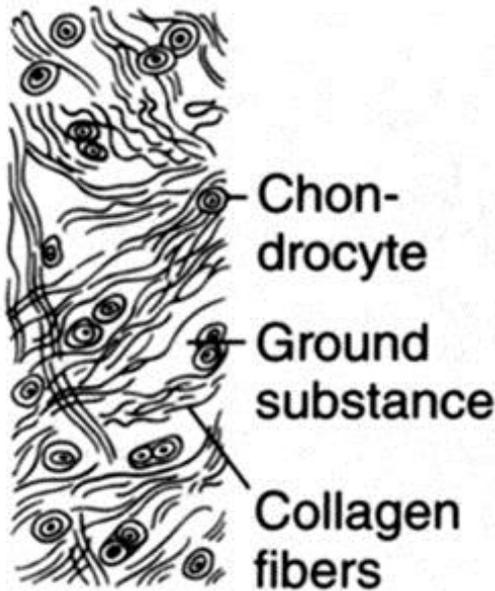
Histologicamente si distingue per la presenza di collagene tipo II, assente in altri tipi di cartilagine.



# Cartilage



Hyaline cartilage

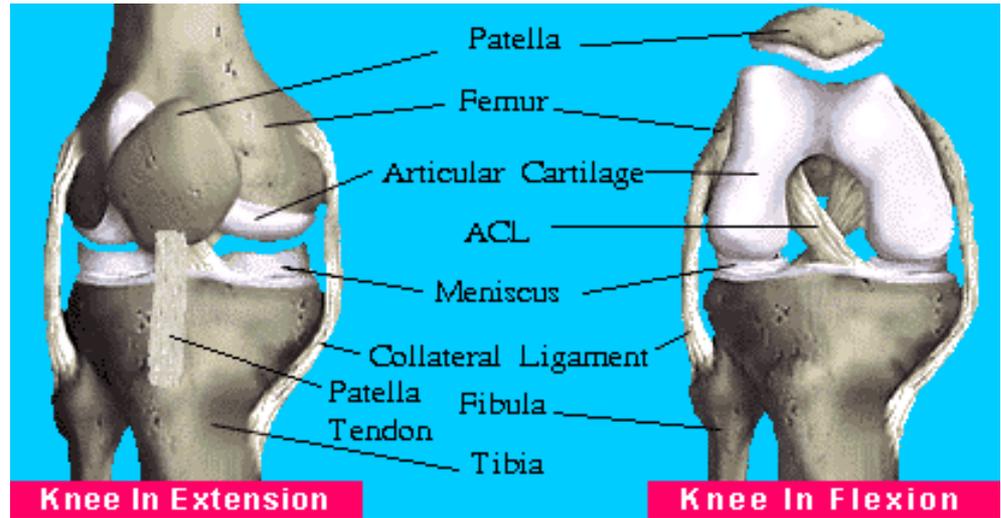
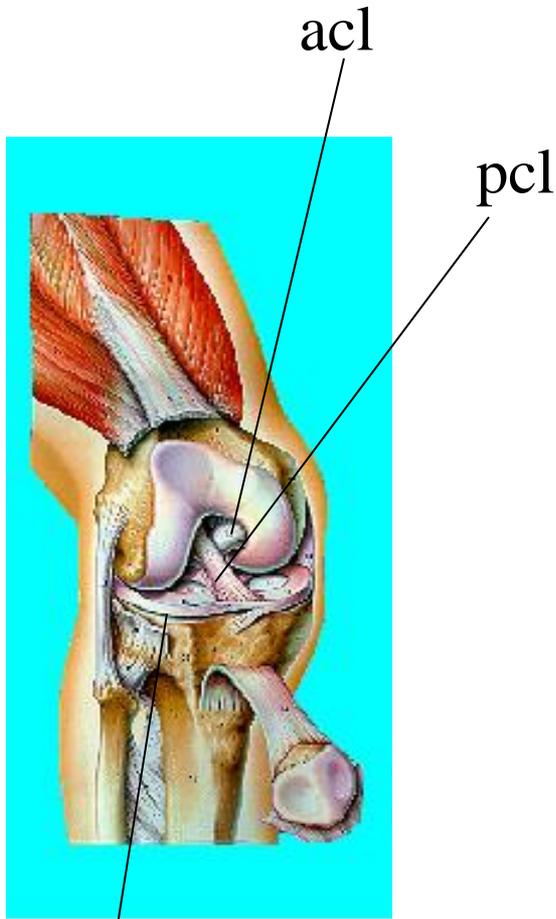


Fibrocartilage



Elastic cartilage

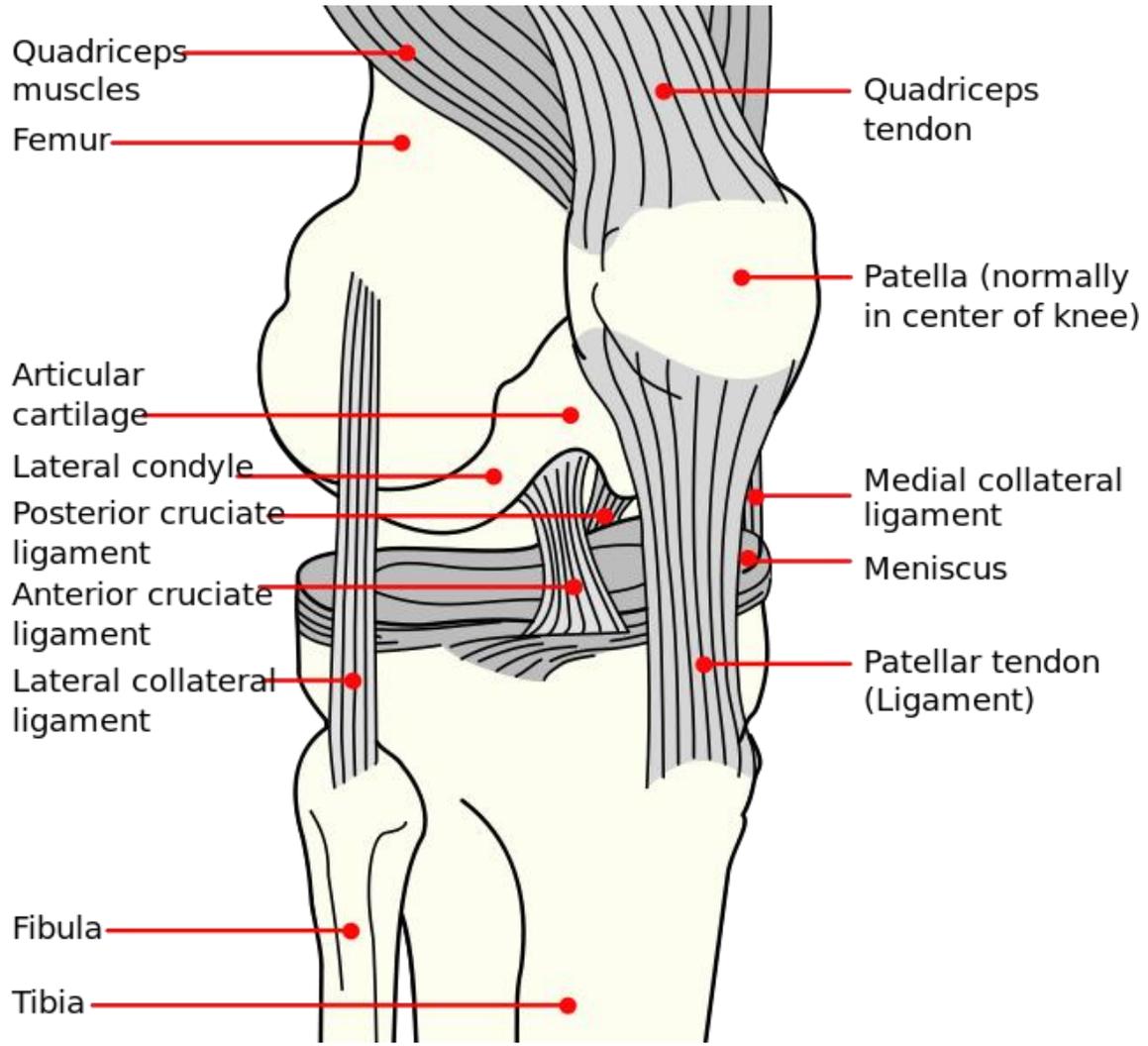




menisco

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





# Proprietà di cartilagine articolare

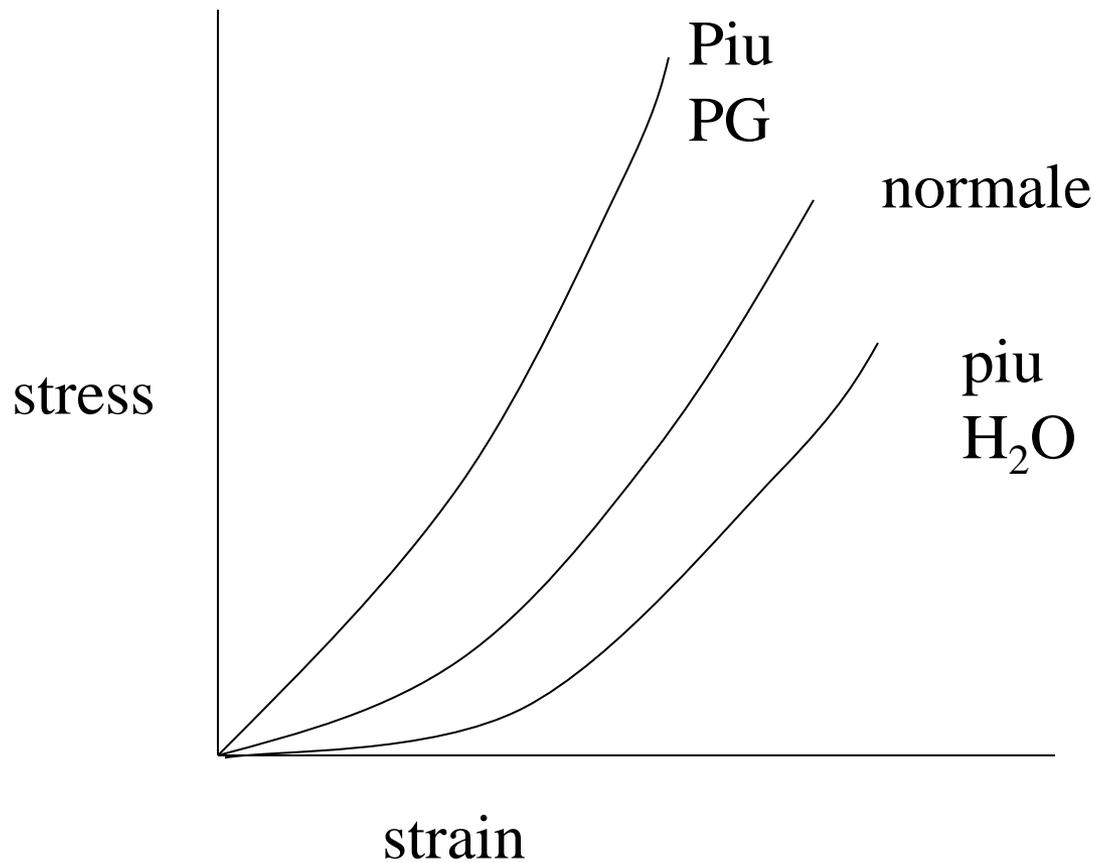
Alto contenuto di  $H_2O$ : 75%. Il resto è collagene (tipo II 15%), e proteoglicani (10%). Il contenuto di PG è alto e la capacità dei PG di attrarre  $H_2O$  è fondamentale per il funzionamento della cartilagine. Diverse malattie sono associate con la disfunzione del PG, st la sovra produzione di enzimi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

pH basso.





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

Questo e' il modulo compressivo. Dipende da H<sub>2</sub>O e i PG, ma non dal contenuto di collagene (perche?). Sono i PG a determinare la rigidezza del cartilagine



## 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.

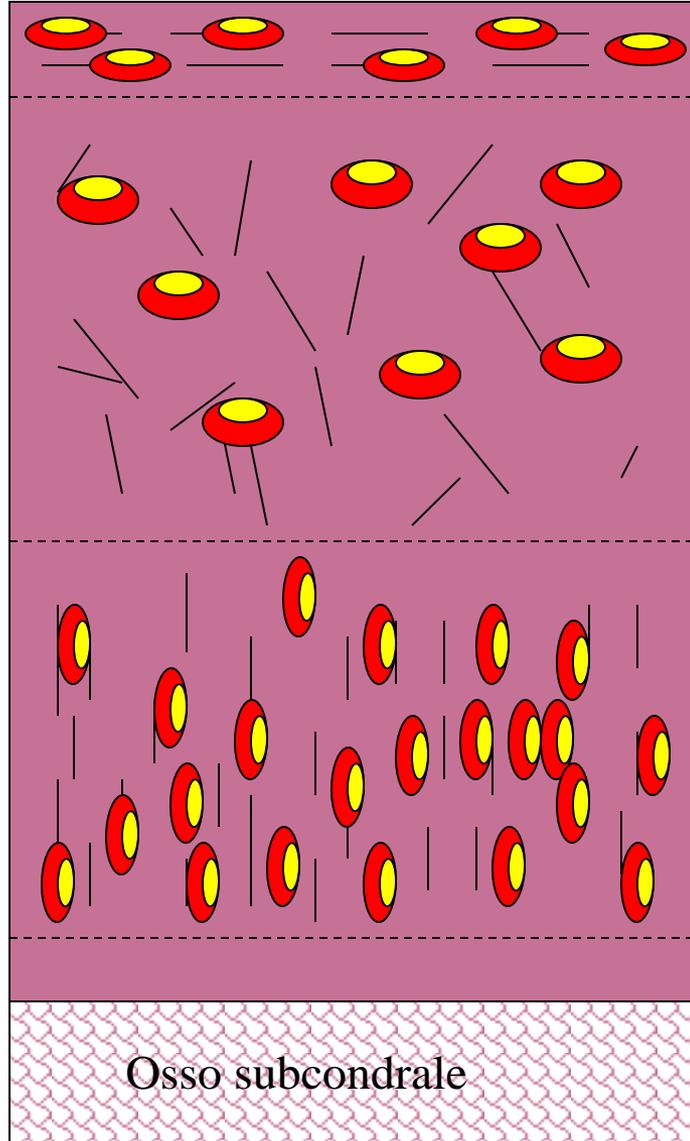
È un sistema poroso e bifasico: la frazione di volume di acqua è la porosità

Le proprietà tensili e compressive sono diverse



Superficie articolare

Fibrille sono // alla superficie



Zona esterna, 0.3 μm

Zona centrale,  
80-250 μm

Zona interna (deep),  
260- 480 μm

Zona calcificata  
(minimizza conc di stress).  
Tide mark

Spessore totale circa 2-4 mm  
difficile fare misure

Fibrille sono intrecciate e  
⊥ alla superficie



Spessore totale ≈ 4 mm (difficile fare prove meccaniche)



Quando la cartilagine viene deformata, giocate 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  $dp/dx$ .

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

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

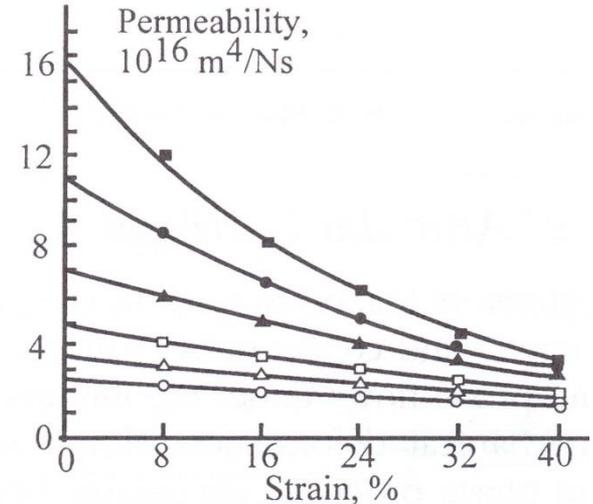
- Zona della matrice ( $K$  è minore all'interno del cartilagine)
- Contenuto di acqua
- Deformazione

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  $\alpha$  sono costanti che dipendono di  $P$ .  $\varepsilon$  è la deformazione

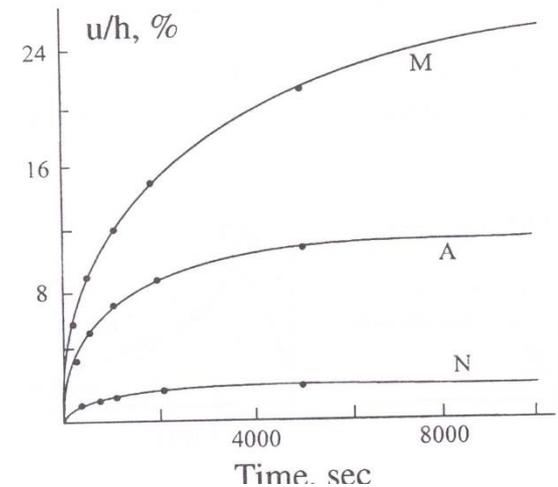
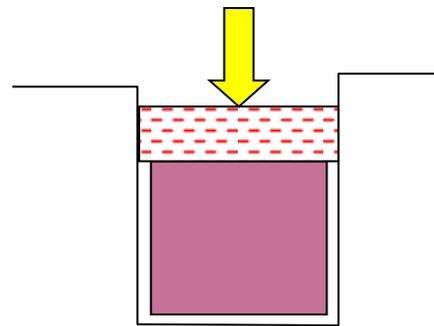
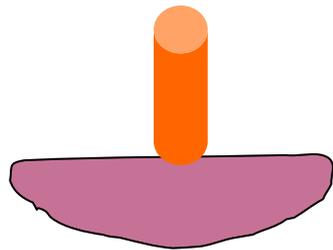


L. 111



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

$K, 10^{-15} \text{ m}^4/\text{Ns}$

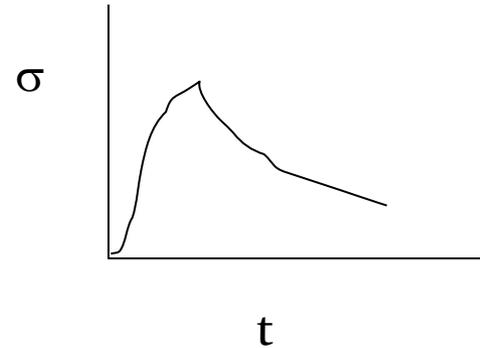
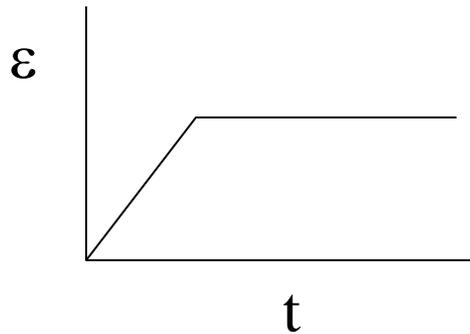
$\text{H}_2\text{O}\% \text{ wt}$

	comp. modulus MPa	$K, 10^{-15} \text{ m}^4/\text{Ns}$	$\text{H}_2\text{O}\% \text{ wt}$
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).



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



## Cartilagine:compartamento tensile

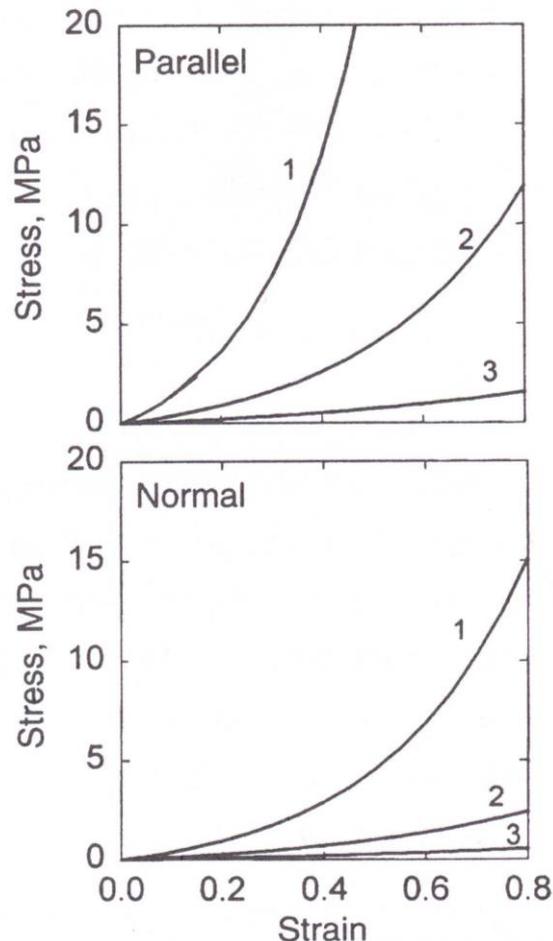
In tensione, sono soprattutto le fibre di cartilagine che supportano cariche. La curva sforzo-deformazione è quella tipica di collagene, con le tre zone (toe- esponenziale, e lineare). Non si arriva a una zona lineare ampia perche le fibre rompono prima di raddirizzare. Un equazione empirica che descrive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

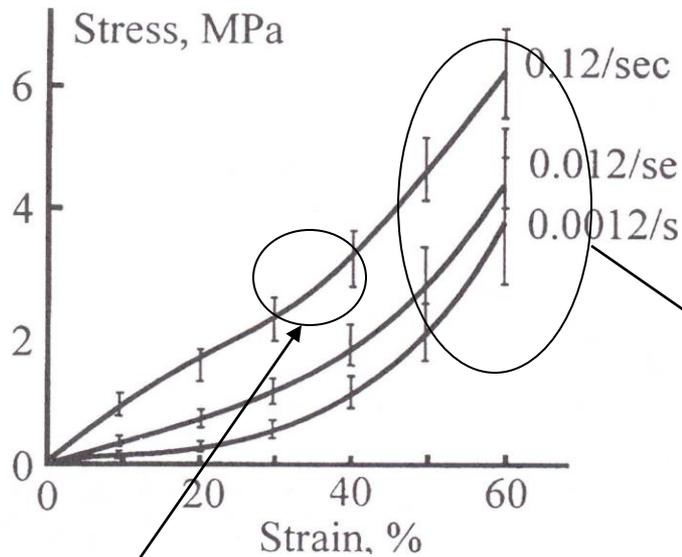
$$\sigma = A(e^{B\varepsilon} - 1)$$

*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 perpendicolare (v. Figura).

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





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 ghiaccio su ghiaccio). Il lubrificante è fluido sinoviale. Il principale meccanismo di funzionamento è lubrificazione elastoidrodinamica.

$\mu$  Cartilagine /fluid sinoviale (dinamico)  
0.005-0.02

$\mu$  ghiaccio su ghiaccio 0.02

$\mu$  gomma su cemento 1

Forza di attrito  $F$  dipende dalla forza normale  $N$ , ma non dall'area di contatto

$$F = \mu N$$



# Diversi meccanismi di lubrificazione

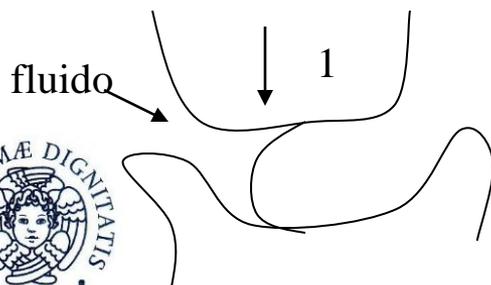
Lubrificazione in superficie: il lub viene assorbito su una superficie rugosa per attenuare la rugosità e ridurre adesione.

Lubrificazione idrostatica: il fluido viene pressurizzato quindi è più efficace

Lubrificazione idrodinamica: il fluido muove (come un idroplano) e appicca 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 rimane intrappolato tra i superfici.

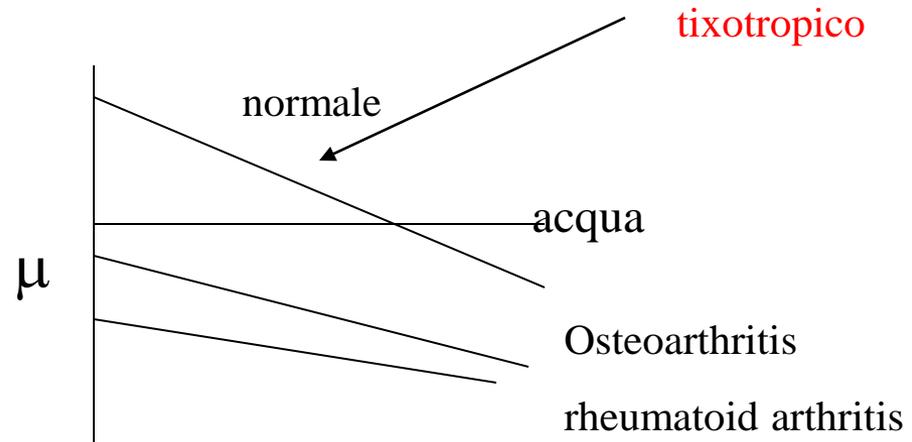
- 1) Si muove superficie 1
- 2) Le molecole del liquido sono appiccate alle pareti. Attraverso la loro viscosità inducono movimento nelle molecole al centro.
- 3) Questo crea una pressione idrodinamica che tende a separare le due superfici.



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.

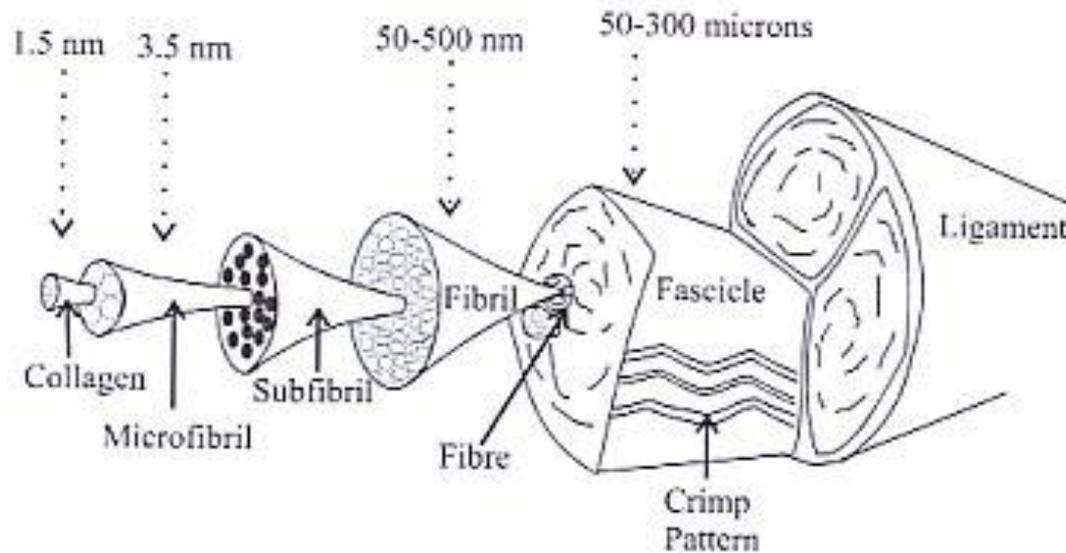
Cambiano anche le proprietà meccaniche del fluido sinoviale (meno tixotropico con età e malattia).



$\gamma$ , 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



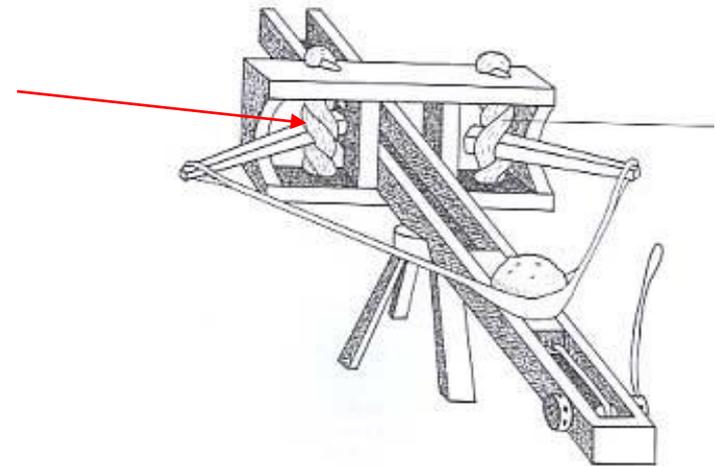
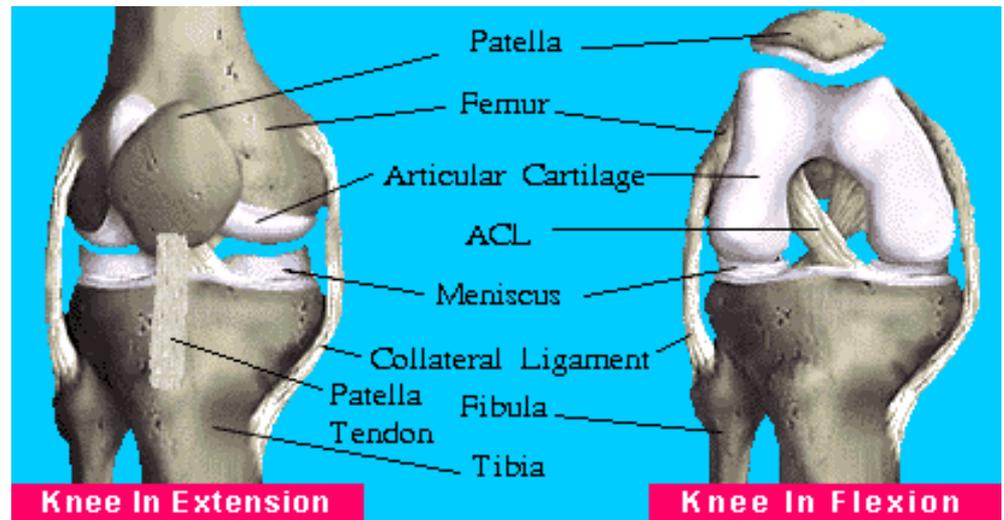
Legamenti: stabilizzazione  
passive delle articolazioni.  
Originano nell'osso e si  
inseriscono nell'osso. Sono  
vascolarizzate e innervate.  
Hanno anche una funzione  
prorocettiva grazie a dei  
meccanorecettori sensibili alla  
deformazione.

## Confrontiamo

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

Immagazzinano energia elastica.

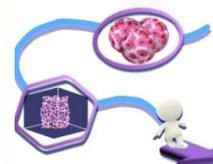
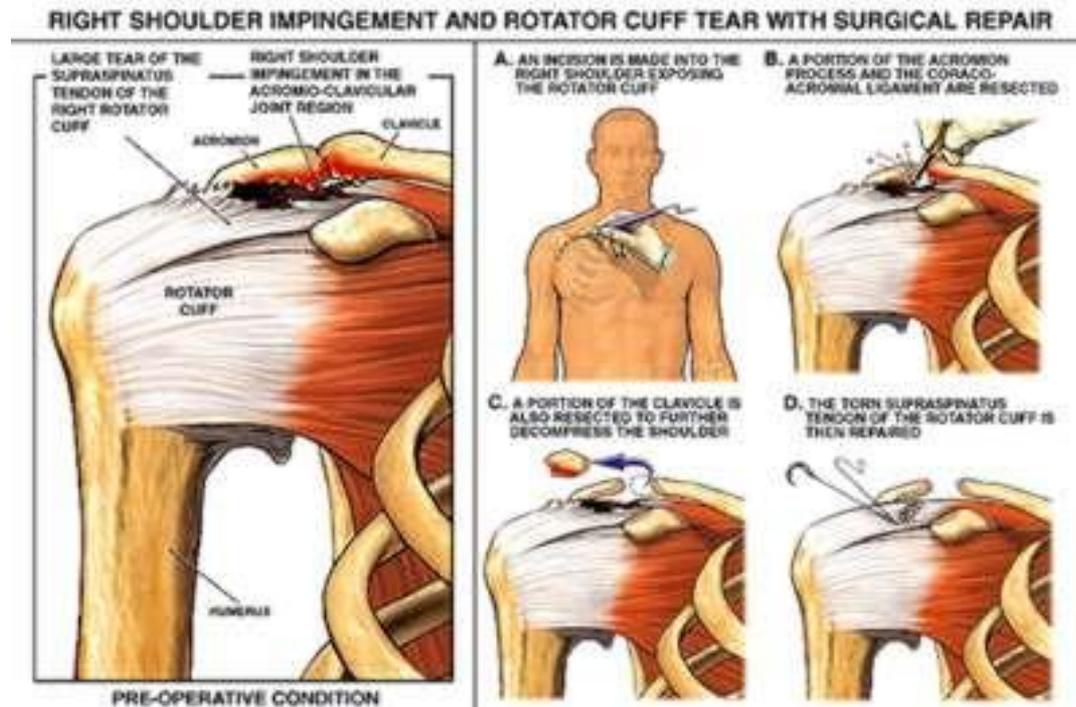
Sono innervate, vascolarizzate e  
altamente prorocettive.



			% 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.

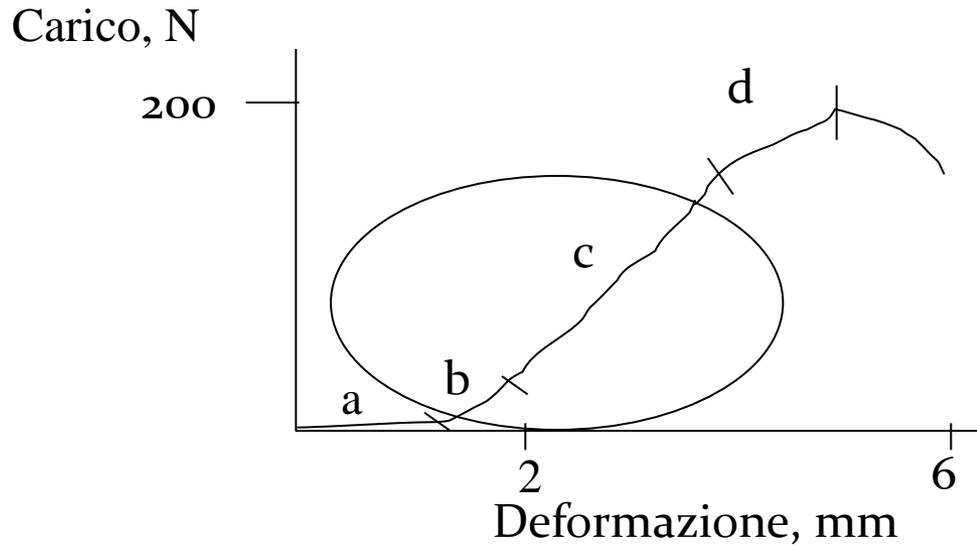
Tendine: Tanta collagene , predominante tipo I, meno elastina. Alcuni tendini hanno più PG se sono soggetti a stress compressivi o devono strusciare lungo un osso (vedere spalle). Cellule tenociti son Fb specializzati



Tissue, human	Location	Tensile Modulus MPa
Tendon	Achilles	819
Tendon	Platellar	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

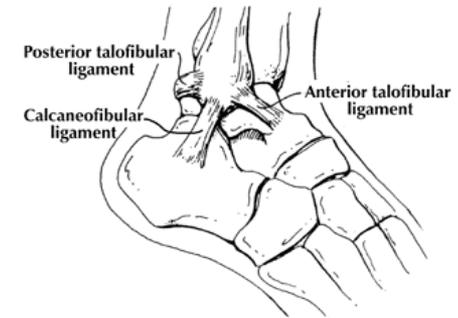


## Le proprietà stress-strain sono dominate dal collagene



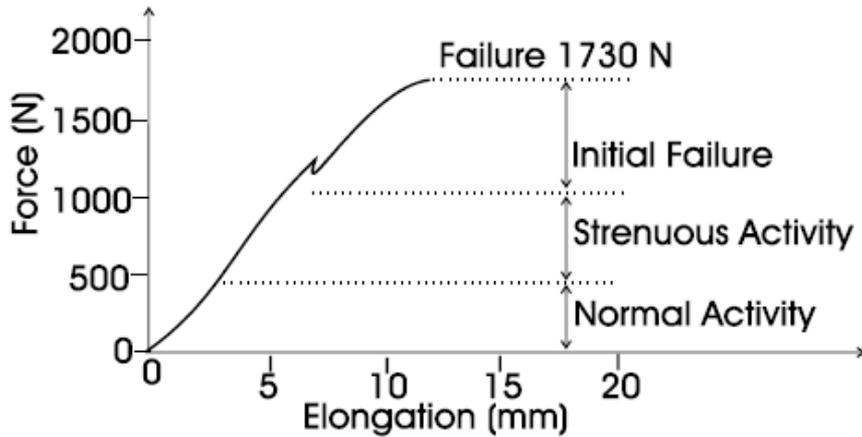
Fallimento: circa  
12-15%  
deformazione

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 vivo 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. C'è ancora qualche dibattito su quale è la zona fisiologica.





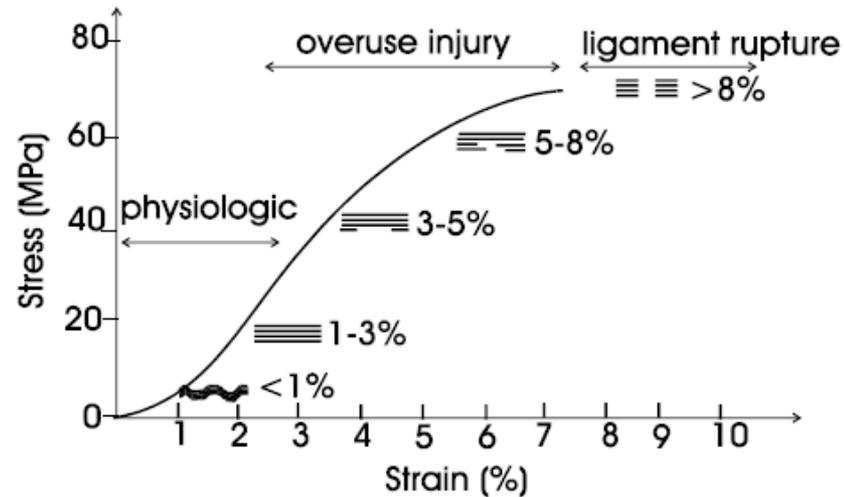
Curva ipotetica di forza-allungamento per il complesso ACL-osso.

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.

Stress-strain curve illustrating the relationship between changes in the collagen "crimp" pattern, or stretch, and ligament mechanical properties is shown. Increases in ligament strain in the "toe region" of the curve results in straightening of the "crimp" pattern. During the linear portion of the curve the collagen fibers are stretched. As the ligament is further strained isolated ligament fibers begin to rupture and if deformation continues, then complete ligament fail occurs.

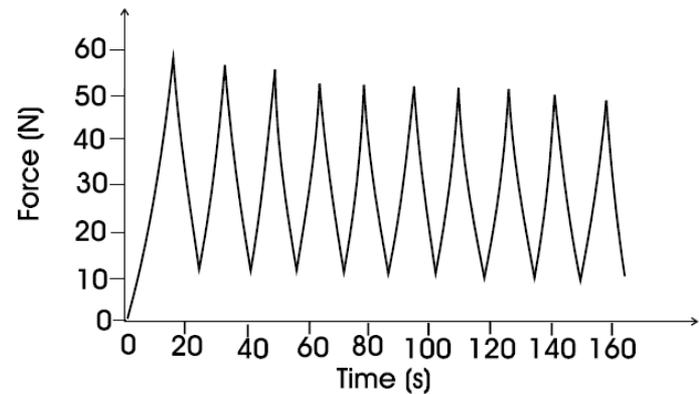
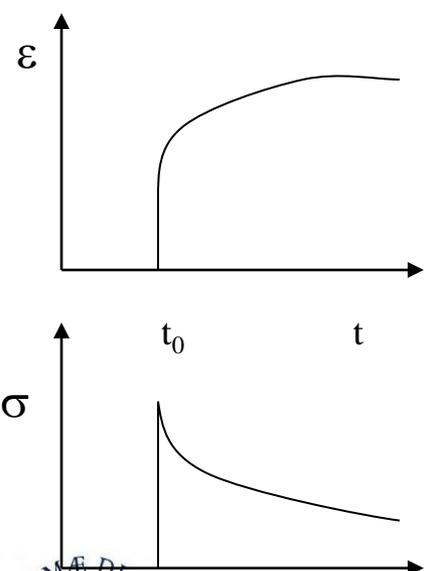
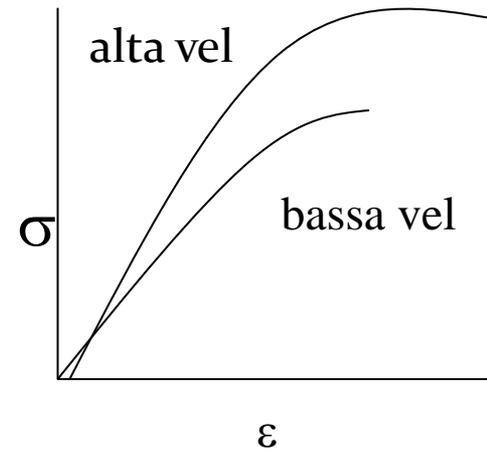


## Proprieta Meccaniche in tensione

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

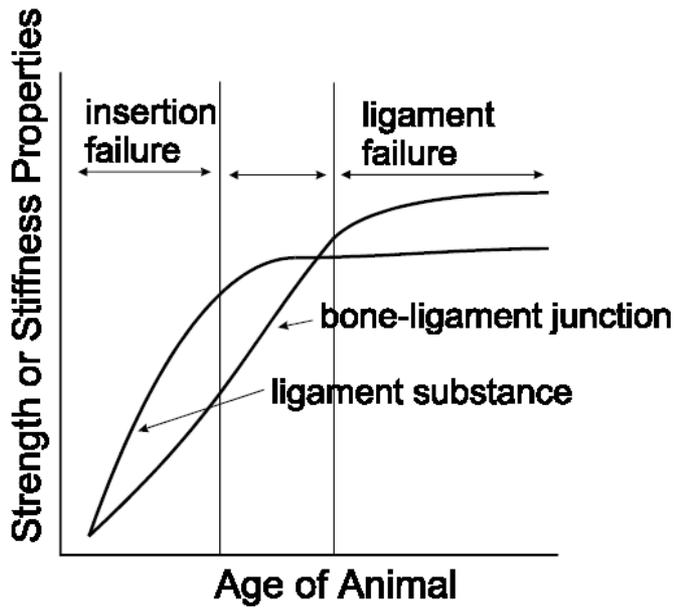


Legamenti e tendini mostrano un tipico comportamento viscoelastico: stress relaxation, creep, isteresi e preconditionamento. Il comportamento è sempre come il modello Kelvin, ma non si può dire a cosa attribuire i parametri.



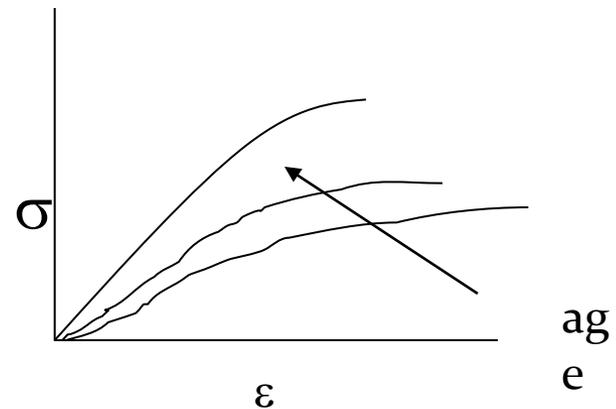
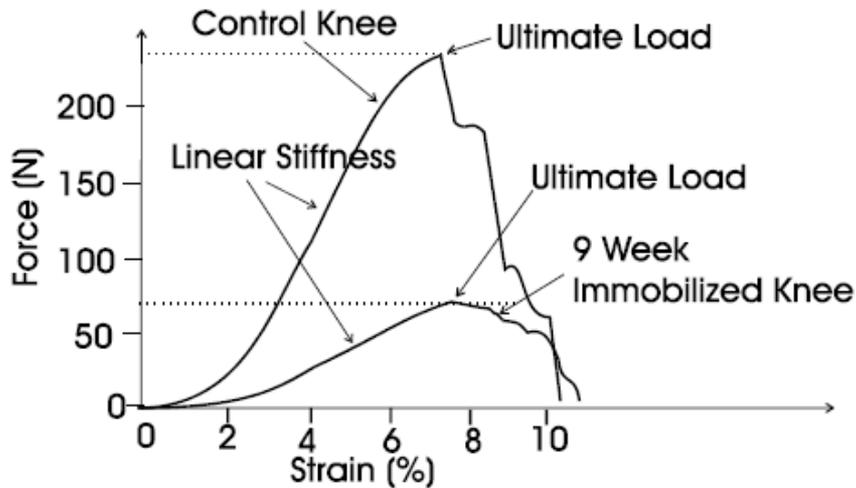
Risposta tipica a carico e scarico ciclico.  
Il legamento “ammorbidisce”





Età e immobilizzazione:

Divento piu rigide e meno plastiche e assorbono meno energia.



Coniglio immobilizzato

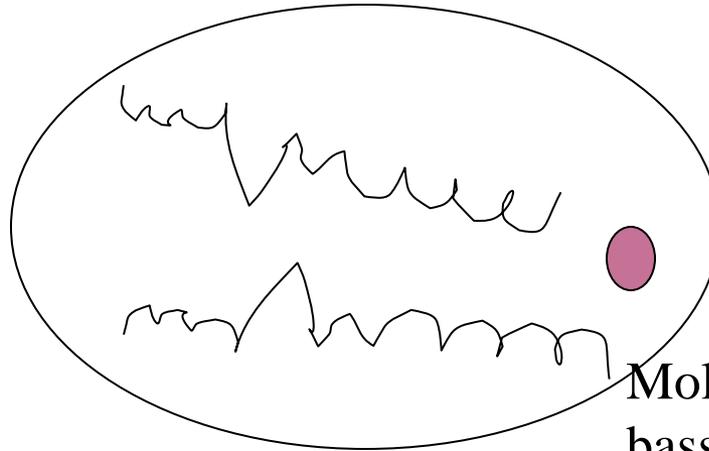


Tendine spessi e corti sono più rigidi (def assoluto)(ad esempio nelle gambe), producono molta forza e energia.

In contrasto, tendini lunghi e sottili sono più deformabile e hanno alta precisione e range ma poca forza (nelle dite).

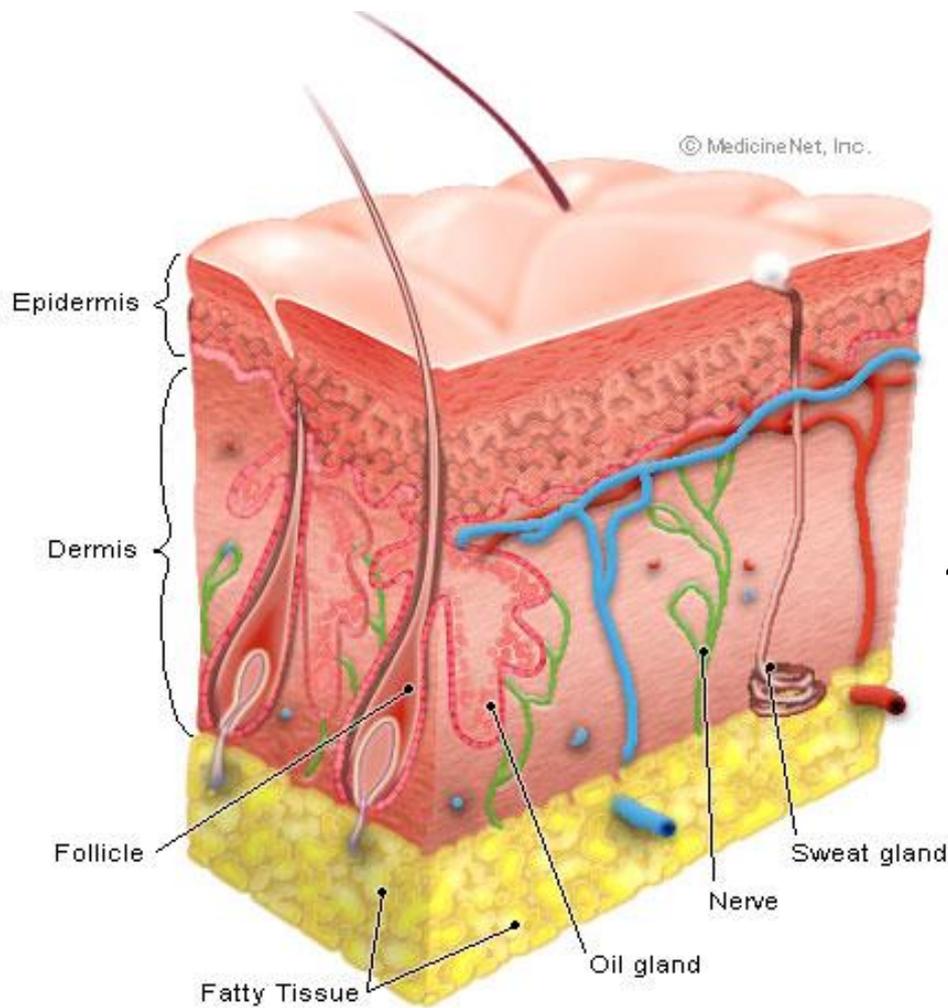


Canini,  
incisivi,  
bassa forza,  
alta  
velocità.



Molari, alta forza,  
bassa velocità





**Normal Skin**

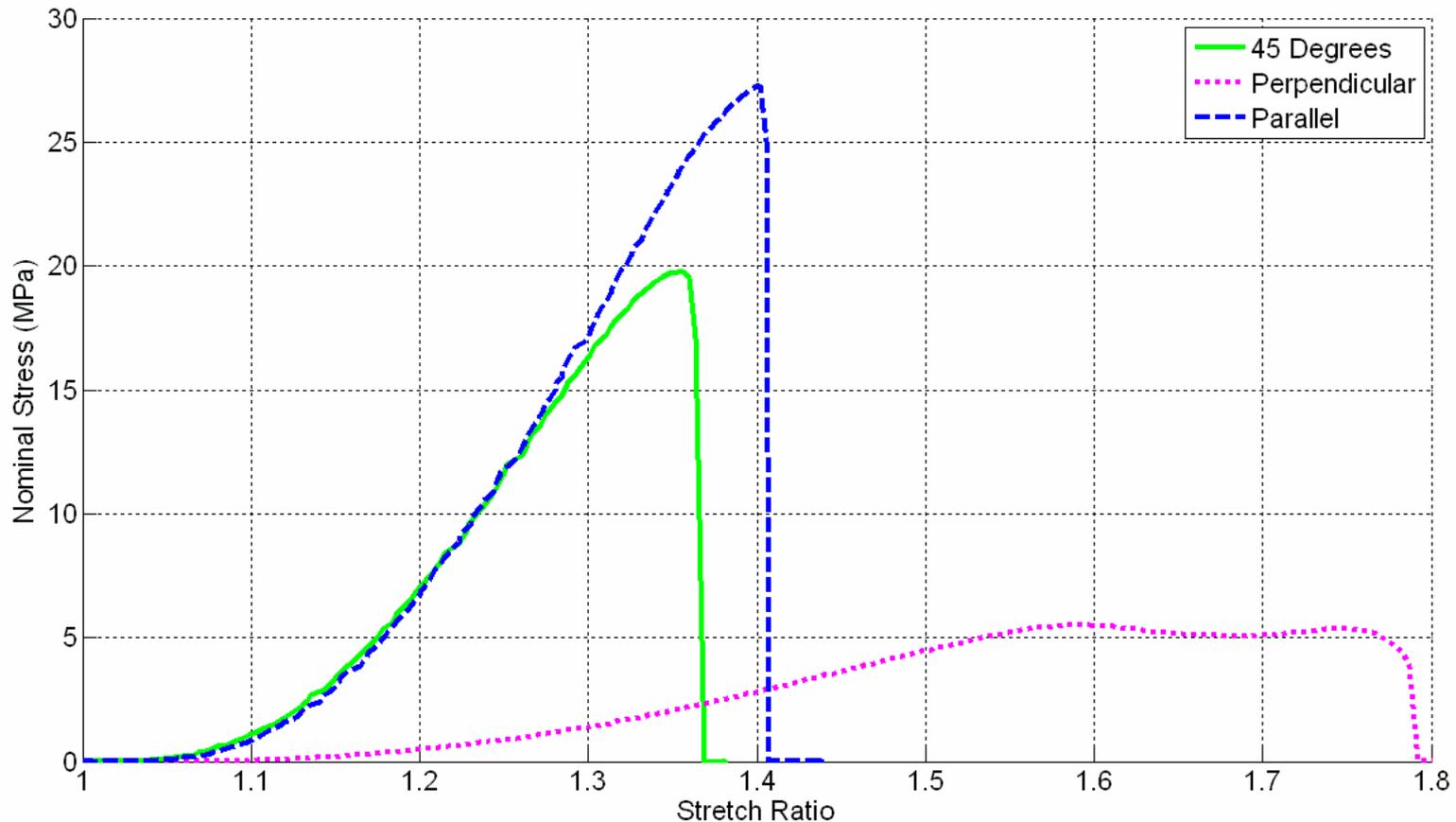
Epidermide: cheratinociti, differenziano per formare stratum corneum e sono responsabili per rinnovo e coesione della pelle esterna. La barriera

Dermide: cellule mesencimali, st fibroblasti che secernano collagene ecc. La parte di supporto meccanico, e ha le ghiandole, terminali nervose

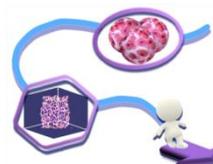
Ipodermide: st adipociti

La pelle e' sempre regenerato e l'epidermide ha viene e riciclato in 3 settimane.





Pelle umana, dalla schiena, // a linee di Langer, perpendicolare e 45°, da [http://www.maths.nuigalway.ie/~destrade/publications/destrade\\_c11.pdf](http://www.maths.nuigalway.ie/~destrade/publications/destrade_c11.pdf)



## Esercizi

1. “La funzione della cartilagine è di assorbire forze”. Verifichiamo questo. Supponiamo uno strato di 5 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 50 MPa & 200 MPa rispettivamente, calcolare il percentuale di energia contenuto in ogni tessuto.
2. Una persona di 60 kg trasmette 2 volte suo peso alle ginocchie mentre corre (perche?). Questa forza è distribuita sulla cartilagine. Quando cade, l'area di contatto cambia da 15 cm<sup>2</sup> a 0.5 cm<sup>2</sup>. Calcolare lo stress, la deformazione e l'energia di deformazione nei due casi. La forza rimane uguale. Lo spesso della carti. È 5mm ed è lineramnete elastico con 8un modulo di 100 MPa.
3. E' stato postulato che riscaldament 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 rilascita 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?



4. Consideramo 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

