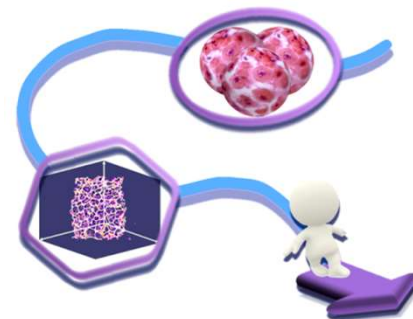


# Biomechanics of Soft Tissue: An introduction

Arti Ahluwalia

**Arti.ahluwalia@centropiaggio.unipi.it**

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



# Esame

- Scritto

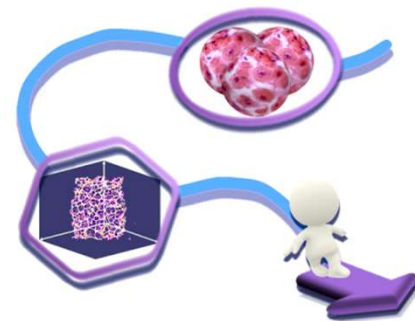
## Libro e slides

- Slides sul [homepage@centropiaggio/Teams](mailto:homepage@centropiaggio/Teams)
- Libro: Biomeccanica, Radaelli e Montevvecchi, Patron

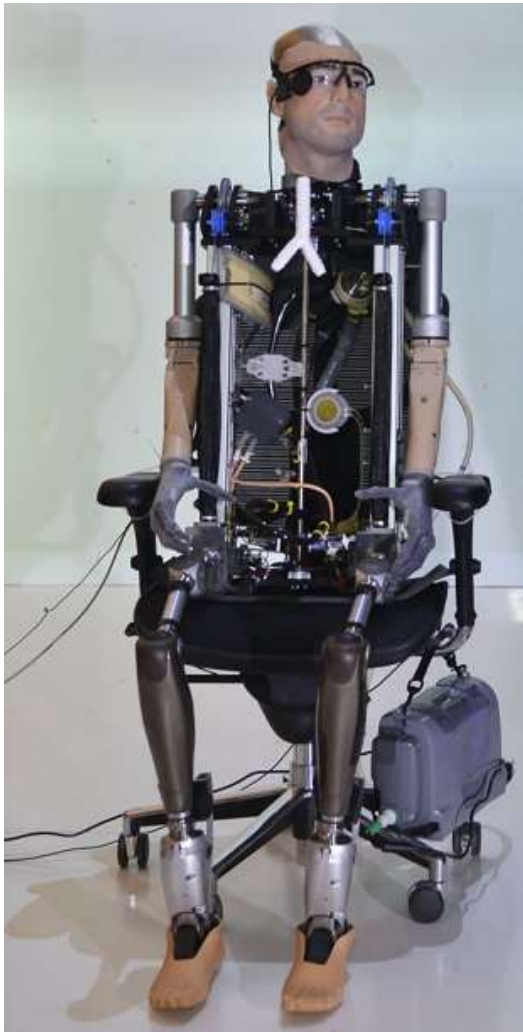
# Contenuti del corso

Obiettivo: Conoscenze di base prop meccaniche dei tessuti molli e idrati

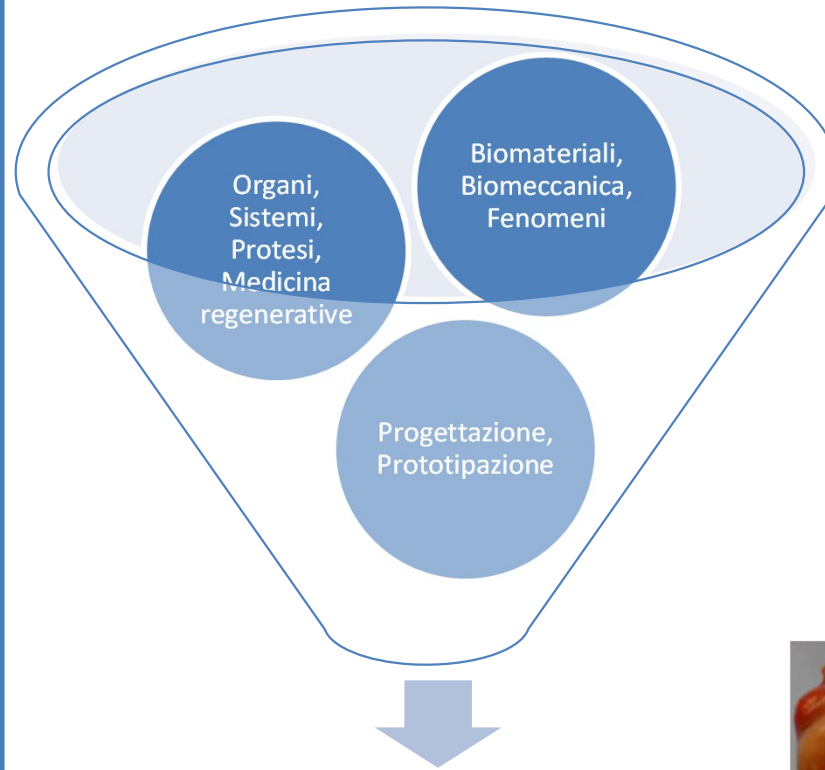
- Materiali e tessuti viscoelastici
- Collagene e elastina, pelle, polmoni
- Cartilagine, legamenti, tendini
- Sangue, vasi
- Muscolo scheletrico e cuore



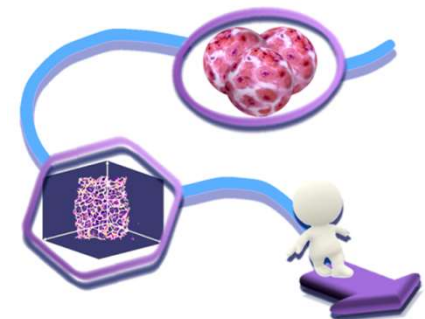
## Approccio 1

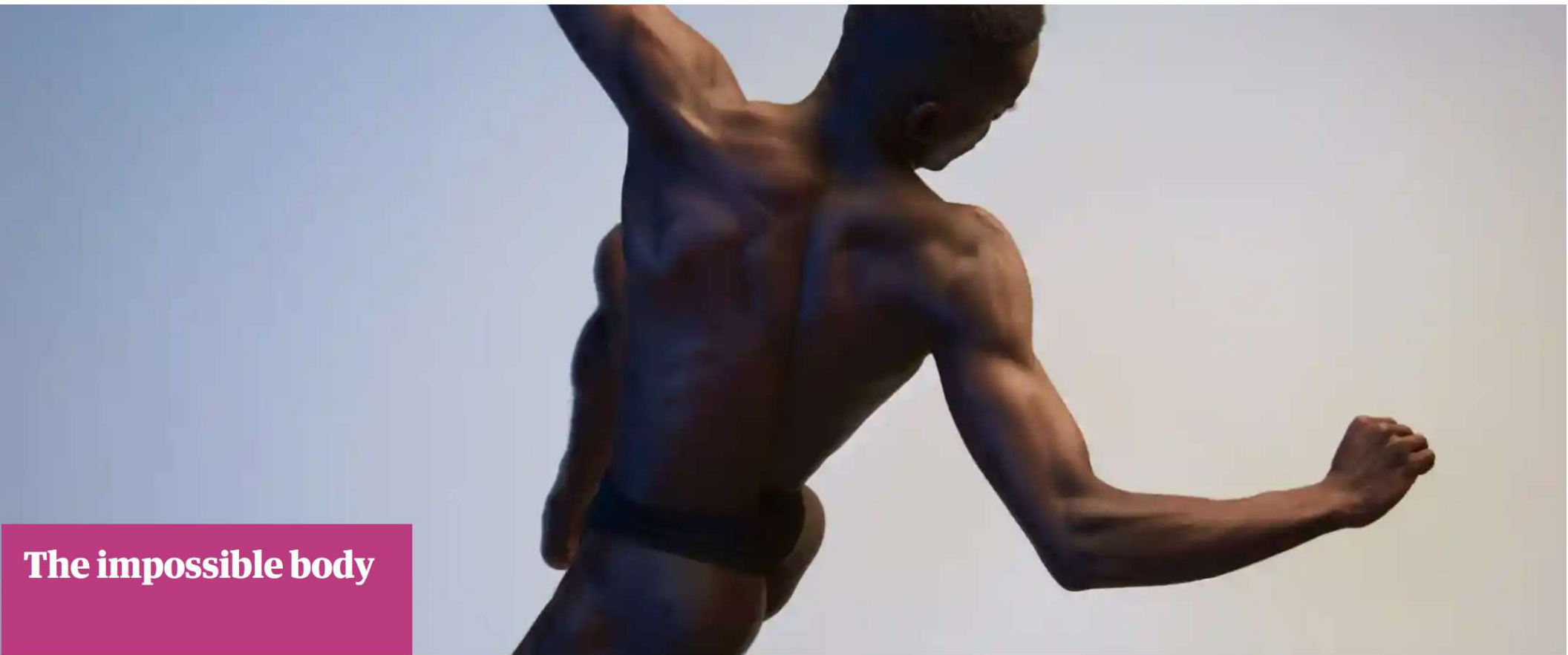


## Approccio 2



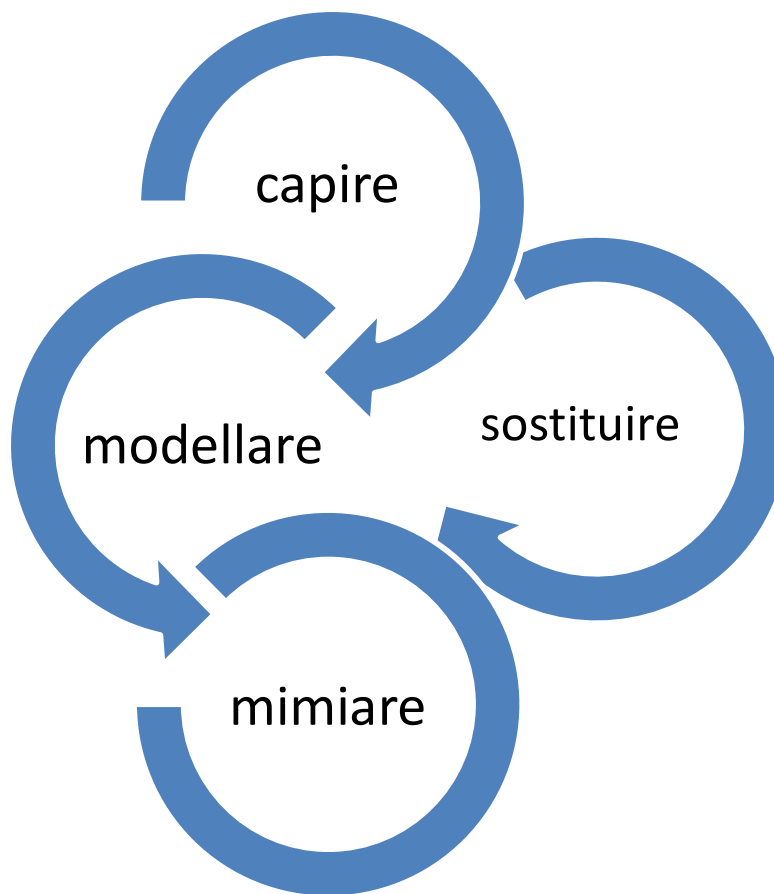
Biological Engineering





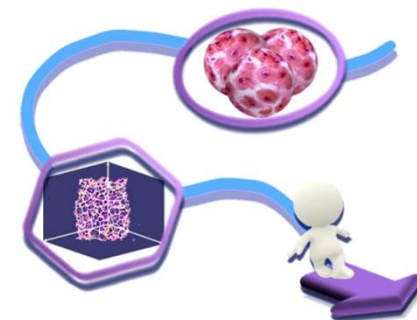
**The impossible body**

**'We will get regular body upgrades': what will humans look like in 100 years?**



Andate a Body Worlds

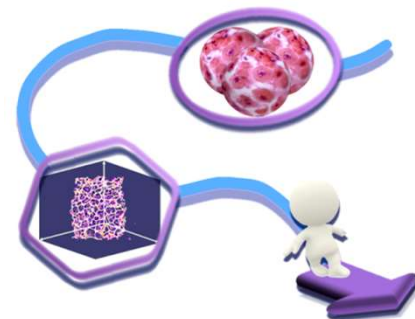
<http://www.bodyworlds.com>



# Contenuti del corso

Obiettivo: Conoscenze di base prop meccaniche dei tessuti molli e idrati

- Materiali e tessuti viscoelastici
- Collagene e elastina, pelle, polmoni
- Cartilagine, legamenti, tendini
- Sangue, vasi
- Muscolo scheletrico e cuore



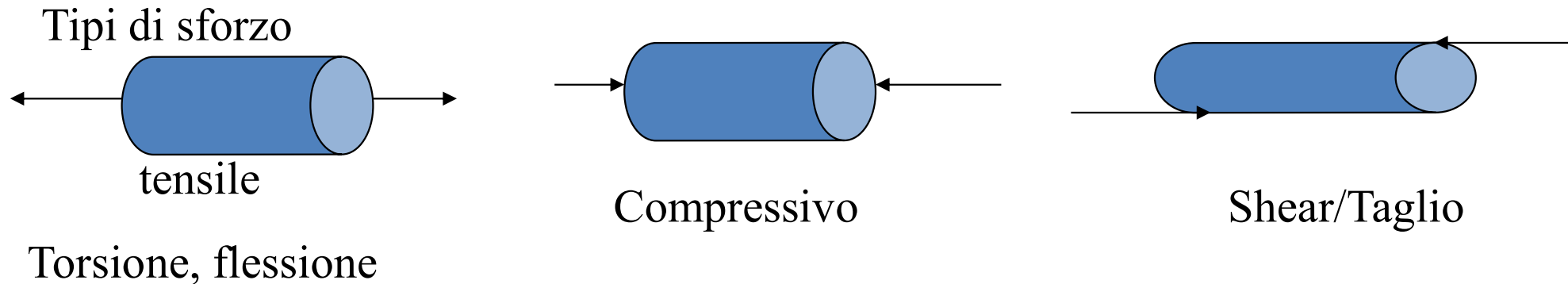
Models	Organisation	Dimensions (m)	Description	Balances
System Analysis	Apparatus	$10^0$ - $10^{-1}$	Complex Systems	Statics, dynamics, kinematics
Compartmental Models	Organs	$10^{-1}$ - $10^{-3}$	Systems	Lumped or distributed parametrs
Continuum mechanics or tensegrity	Tissue	$10^{-4}$ - $10^{-5}$	Continuous or anisotropic systems	Thermodynamics
	Cells/ECM and structures	$10^{-6}$		Conservation laws
	Sub structures and macromolecules	$10^{-7}$		Chemistry/electro chemistry
Statistical mechanics	molecules	$10^{-8}$ - $10^{-9}$	Particles	Biochemistry
quantum mechanics	Atoms	$10^{-10}$		Biophysics



# Forze e Sforze

Stress o sforzo: più utile parlare di sforzo anziché forza perché viene normalizzato per unità di area.  $\text{Stress} = \text{forza}/\text{area}$ .  $\text{N}/\text{m}^2$ . Unità: Pascal, Pa.

Uno sforzo non sempre produce una deformazione.

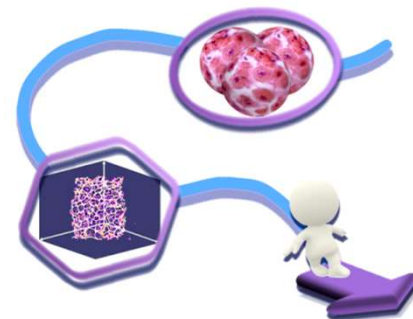


Spesso si usa ancora il dine per misurare forze (unità c.g.s). 1 dine è la forza per accelerare 1 g da  $1 \text{ cm}/\text{s}^2$ .

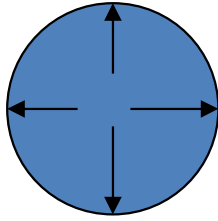
$1 \text{ N} \text{---} 1 \text{ kg} \text{---} 1 \text{ m}/\text{s}^2$

$1 \text{ dyne} \text{---} 1 \text{ g} \text{---} 1 \text{ cm}/\text{s}^2$

$1 \text{ dyne}/\text{cm}^2$  è stress =  $0.1 \text{ N}/\text{m}^2$  o  $0.1 \text{ Pa}$



Pressione (idrostatica ie di un fluido) ha le stesse unità dello stress: (Pa). La differenza? La pressione puo' agire in tutte le direzioni, ed e' sempre riferito alla forza perp. e verso una superficie E' considerate un ampiezza mentre lo stress è un vettore.



Pa

mmHg, Torr

Bar

Atmosfera

Confusione

1 Pa?

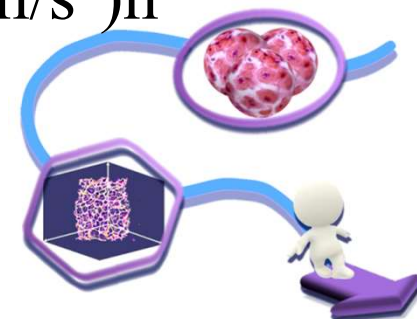
1 Pascal è poco (quanti grammi devono agire su 1 metro quadrato per fare 1 Pa?).

1 atmosfera = 10 100 Pa

Pressione Diastolica = 11 000 Pa + 1 atms, sistolic 14 000 Pa+

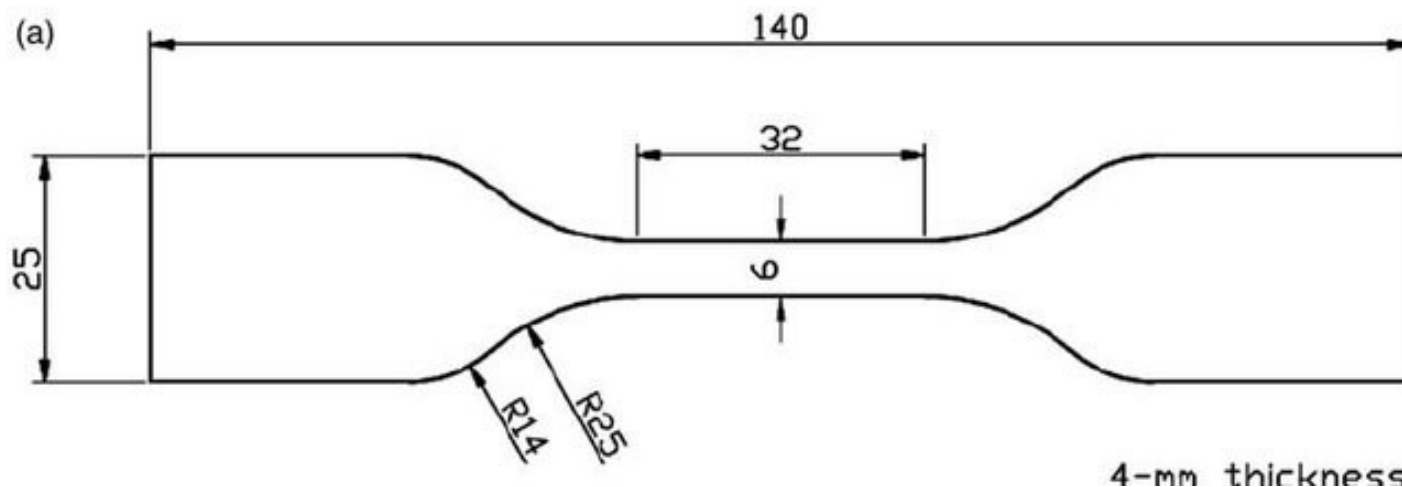
mmHg è una colonna di mercurio ( $p \text{ (Pa)} = \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} g \text{ (m/s}^2\text{)} h \text{ (m)}$ ). 1 mmHg fa una pressione di  $13600 * 9.8 * 0.001$   
 $\text{Pa} = 133.28 \text{ Pa}$

Le pressioni sono (quasi) sempre riferite a atmosferico



# Il test meccanico

- Aumento forza, misuro lunghezza
- Aumento lunghezza, misuro forza
- Dog bone per testing in tensione (ASTM International, formerly known as American Society for Testing and Materials)



Quasi impossibile per  
campioni biologici

# La prova meccanica

- Engineering stress and engineering strain
- (sforzo e deformazione ingegneristico/nominale)
- True stress, true strain (reale)

$$\varepsilon = \frac{L - L_o}{L_o}, \varepsilon_t = \frac{L - L_o}{L} = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{L_o + \Delta l_1 + \Delta l_2} \dots\dots\dots$$

$$\varepsilon_t = \int_{L_o}^L \frac{\Delta l}{L} = \ln \frac{L}{L_o} = \ln \left( \frac{L_o + \Delta l}{L_o} \right) = \ln(1 + \varepsilon)$$

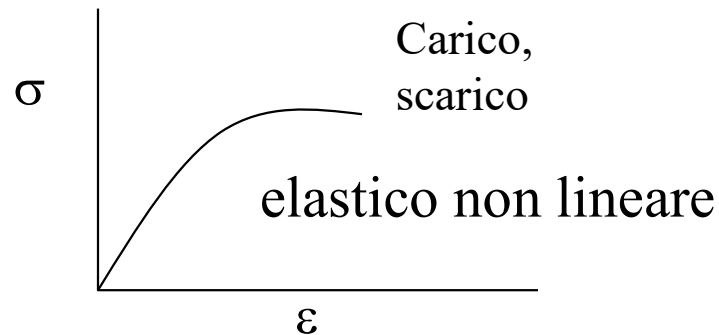
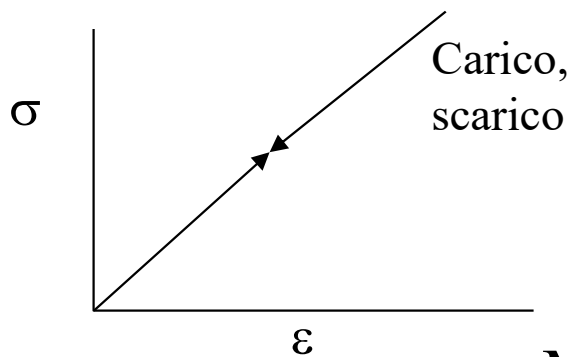
$$\sigma = \frac{F}{A_o}, \sigma_t = \frac{F}{A} = \sigma [\varepsilon + 1]$$

Corpi elastici e viscoelasticità. Sforzo e deformazione  $\sigma$ =stress,  
 $F/A$ ,  $N/m^2$ , Pa

$\varepsilon$ =strain, deformazione

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

Elastico lineare

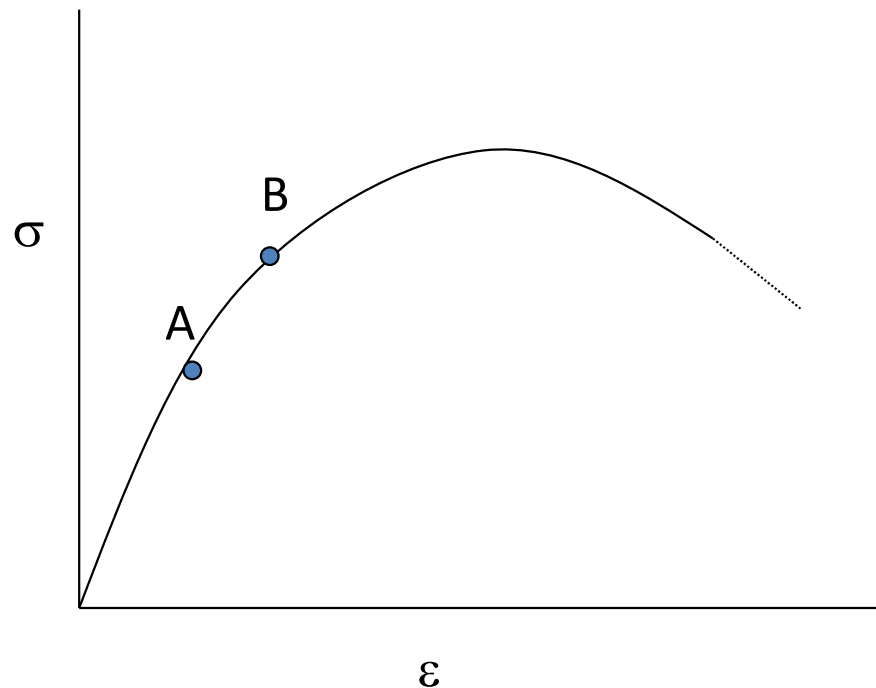


Materiale elastico

$$\int_0^{\varepsilon_f} \sigma_{load} d\varepsilon - \int_0^{\varepsilon_f} \sigma_{unload} d\varepsilon =$$

$$\int_0^{\varepsilon_f} (\sigma_{load} - \sigma_{unload}) d\varepsilon = 0$$

## Curva sforzo deformazione



Limite elastico  
(A)

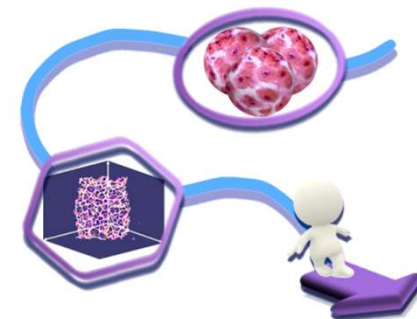
Stress a rottura

Punto di  
snervamento  
(B)

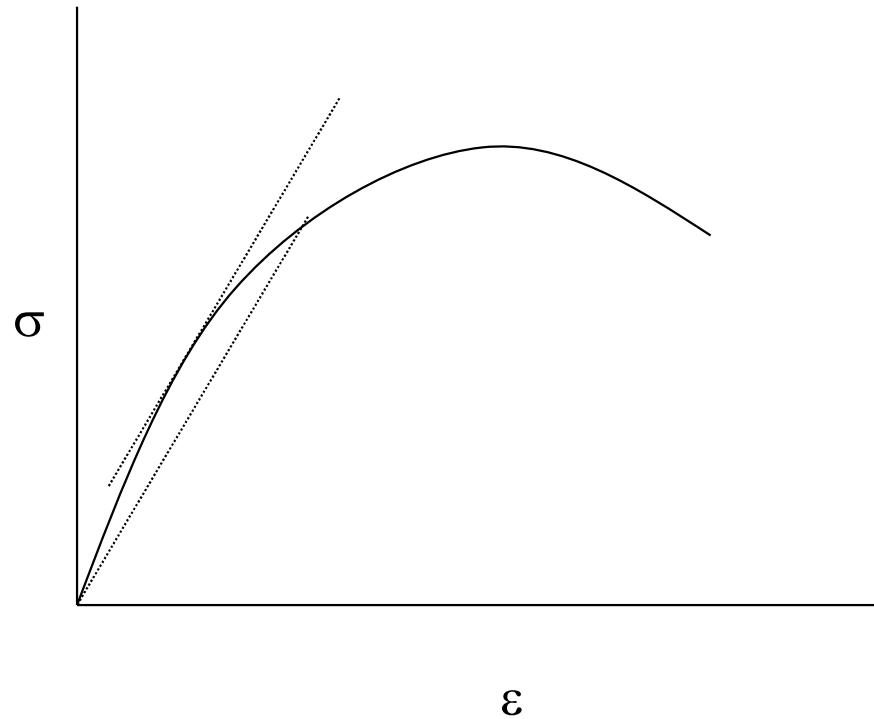
Zone plastica

Legge di Hooke

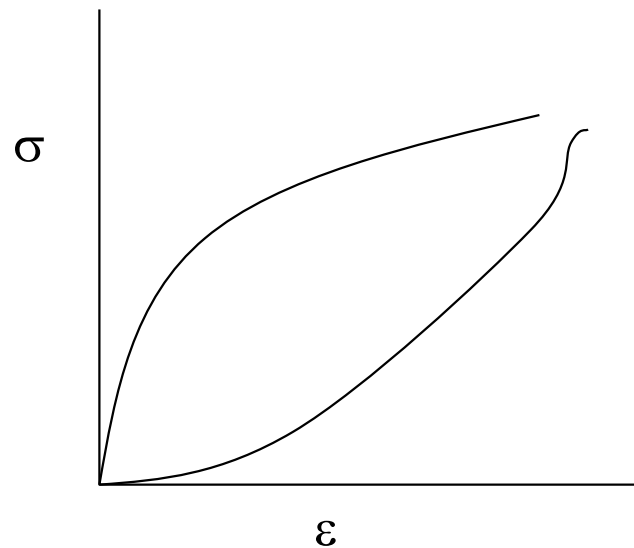
Elastico, rigido, forte, fragile, duttile,  
plastico, compressibile, tenace, resiliente



$\frac{\sigma}{\epsilon} = E$ , un costante per materiali linearmente elastici-  
altrimenti usiamo tangent modulus or secant modulus

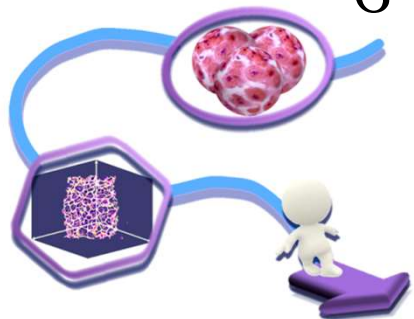


# Il concetto di energia/vol

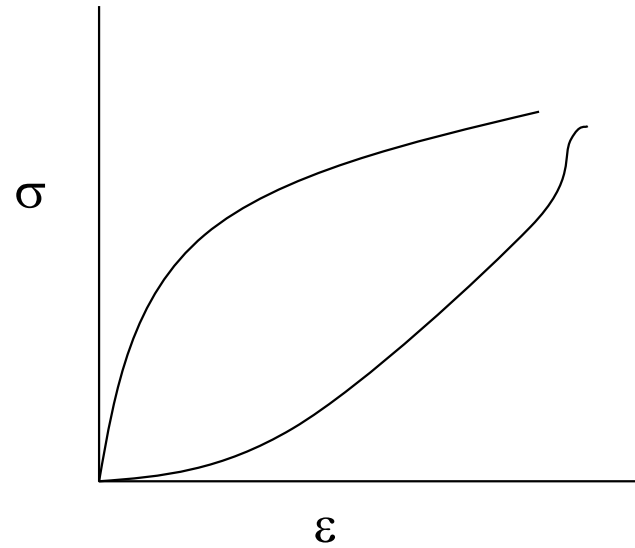


$\sigma^* \epsilon$  = energia per unità di volume ( $\text{J/m}^3$ )

Toughness (tenacità) : energia per unità di volume necessario per rompere un materiale. E' diversa dalla resistenza o sforzo a rottura.

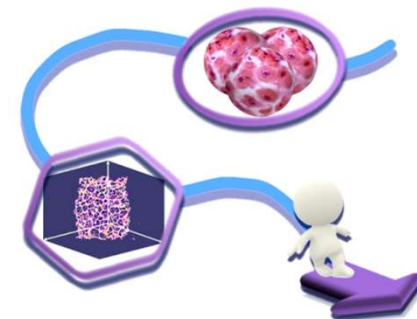
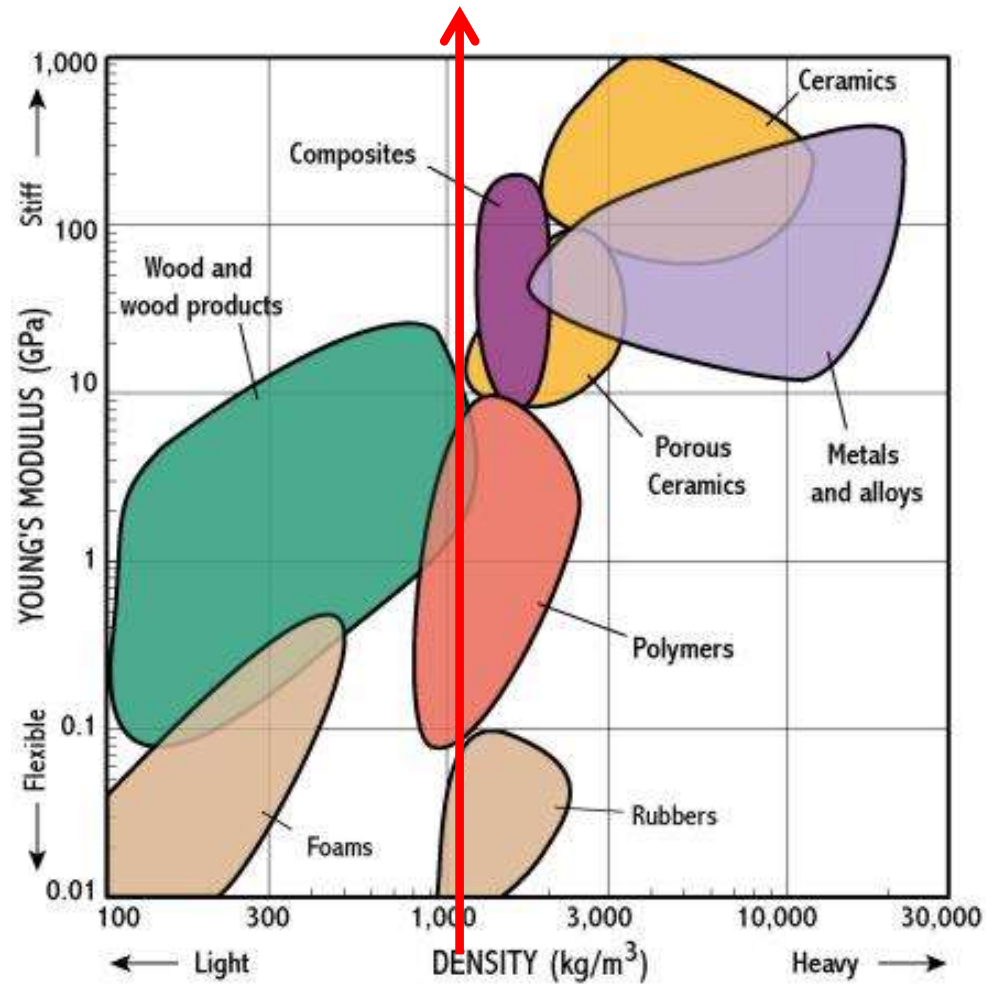


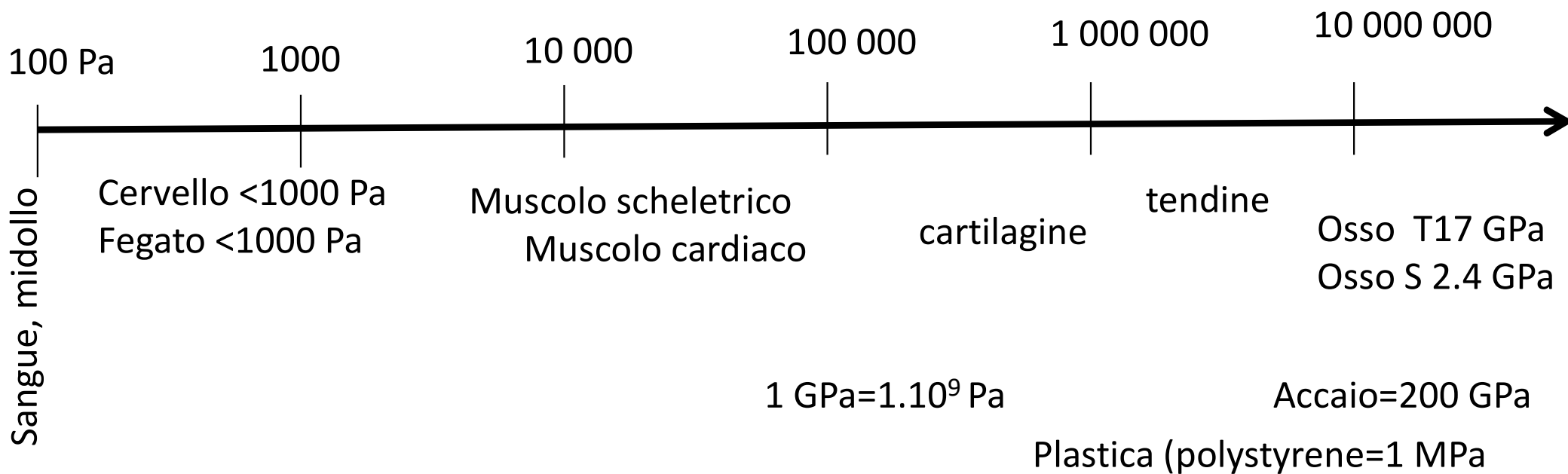
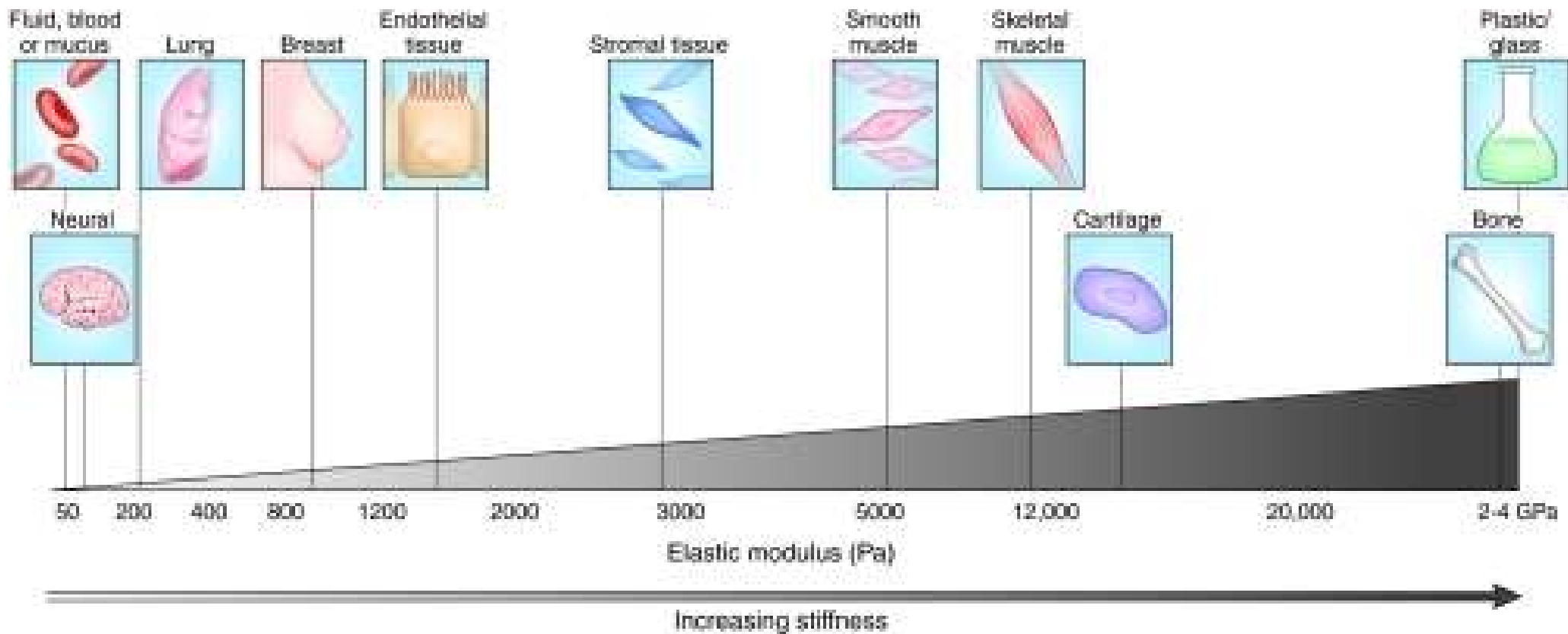


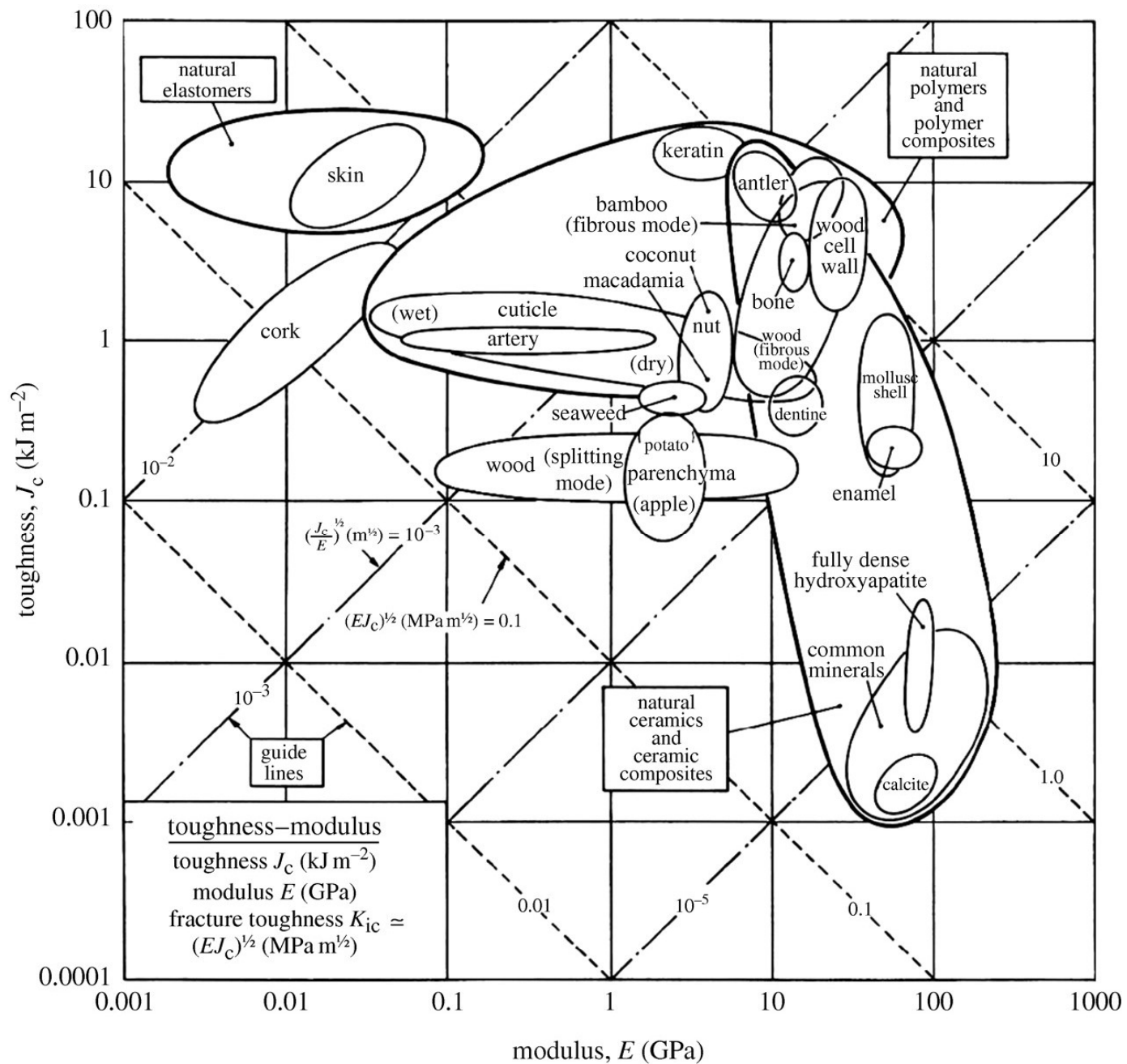


Toughness: energia per unita' di volume necessario per rompere un materiale.  
Tenacita'. E' diversa dalla resistenza o sforzo a rottura.

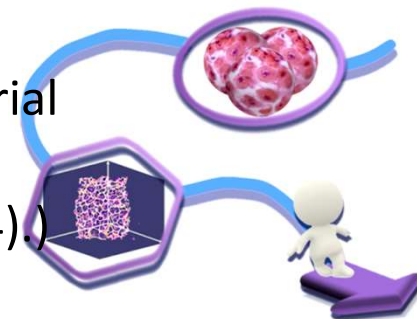
Asbhy Dog plot: Modulo Specifico=modulo/densita'



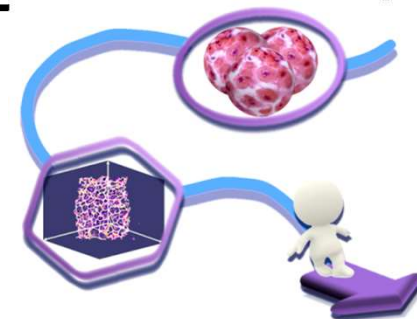




The vertical axis (toughness, tenacità) is a measure of the ability of the material to absorb energy before rupturing., while the horizontal axis (modulus) is a measure of the stiffness of the material. (Adapted from Wegst & Ashby (2004).)



Mechanical Function	Mechanical equivalent	biological subsystem	Tissue type
support	frame	bone	<b>ECM</b> /connective
force Transmission	Chain/rope	Tendon	<b>ECM</b> / connective
fluid Transport	Tube	Blood vessel	<b>ECM</b> /cells
Develop forces	actuator	Muscle	Cells
Reduce friction	pads	Cartilage	<b>ECM</b>
Stabilise moving parts	Kinematic stops	Ligament	<b>ECM</b>
Protection and containment	Body (as in car) or wall	Skin	<b>ECM</b> /cells



Biomeccanica

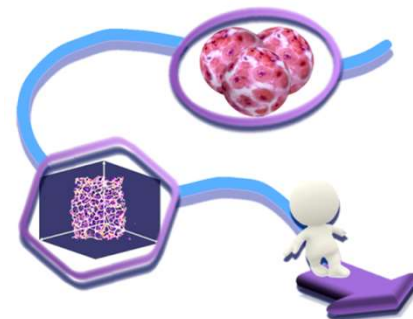
Biomeccanica dei tessuti biologici

Collagene, elastina, la cellula, tendine, legamento, cartilagine, muscolo, cuore, vasi, sangue

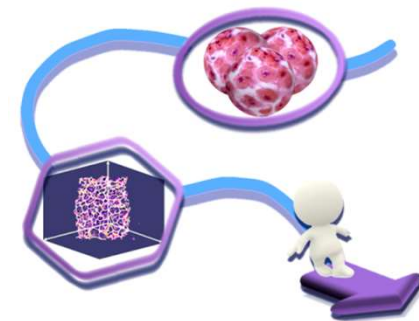
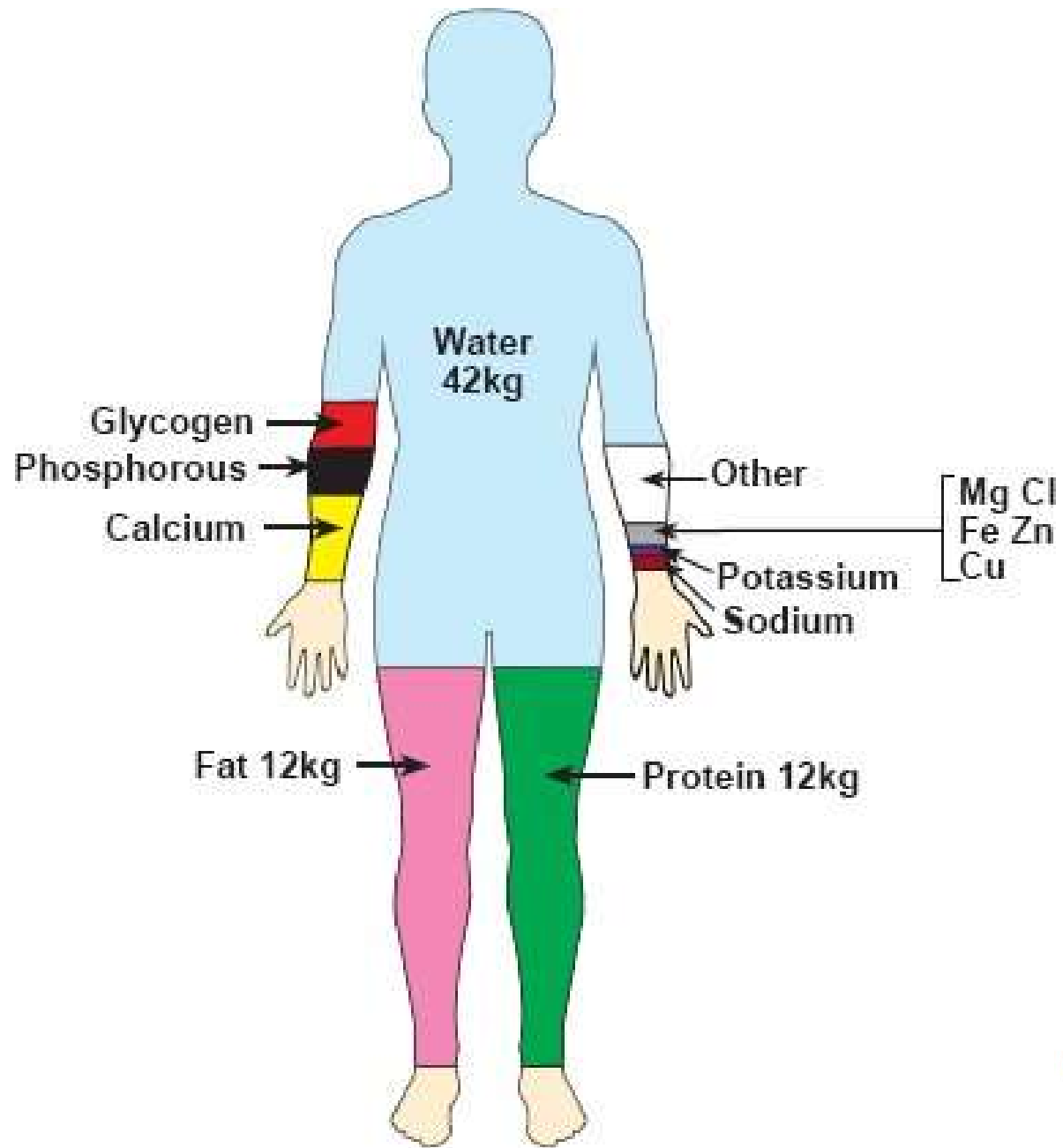
La componente piu importante è **acqua**. (Solo nell'osso è il ruolo di acqua di minore importanza.)

In tutti tessuti biologici, il ruolo meccanico viene fornito dal tessuto connettivo tranne nei nei muscoli.

tessuto connettivo = ECM (extra cellular matrix) + cellule + ACQUA



# RICORDIAMO L'IMPORTANZA DELL'ACQUA



The extracellular matrix (ECM) is an intricate network composed of an array of multidomain macromolecules organized in a cell/tissue-specific manner. Components of the ECM link together to form a structurally stable composite, contributing to the mechanical properties of tissues. The ECM is also a reservoir of growth factors and bioactive molecules. It is a highly dynamic entity that is of vital importance, determining and controlling the most fundamental behaviors and characteristics of cells such as proliferation, adhesion, migration, polarity, differentiation, and apoptosis.

The “**core matrisome**”<sup>3</sup> comprises approximately 300 proteins. Major components include collagens, proteoglycans, elastin, and cell-binding glycoproteins, each with distinct physical and biochemical properties.



Tessuto connettivo è composto di alcune cellule, st. Macrofagi e fibroblasti, tanta acqua e diverse biomolecole.

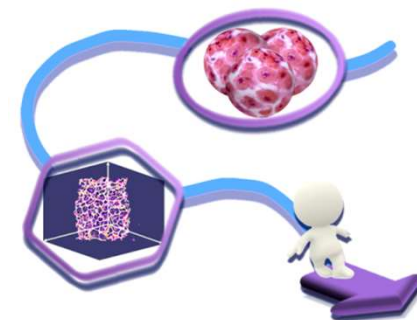
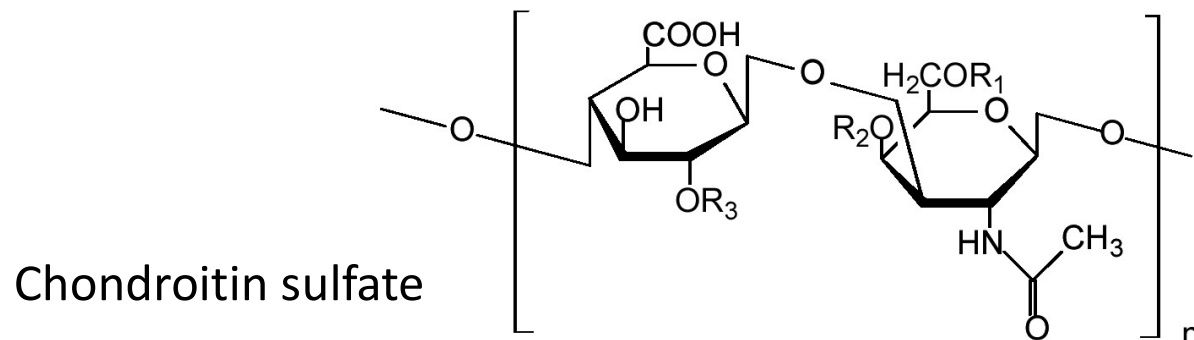
1. **Proteine Strutturali** : collagene & elastina.
2. **Proteine Specializzate (per adesione)**: e.s. fibronettina, & laminina.
3. **Glicosaminoglicani o Mucopolisaccaridi**:

Proteoglicani: nella parte centrale c'è una proteina, circondata da "peli" di zuccheri formati da unita ripetute di disaccaridi. Questi polisaccaridi sono i GAG glicosaminoglicani.

I Proteoglicani sono molto complessi con alto peso molecolare ( $10^{6-7}$ ).

## proteoglicani=GAG+proteina

**GAG: sono hyaluronic acid, dermatan sulfate, chondroitin sulfate, heparin, heparan sulfate, & keratan sulfate.** (l'unico non solfatato e legato alle proteine e acido ialuronico)



I GAG hanno carica negativa e attraggono  $\text{Na}^+$  e quindi  $\text{H}_2\text{O}$ , che è sempre associato con Na nel liquido extra cellulare. I GAG sono altamente viscosi e si estendono e legano anche alla membrana cellulare.

- Grazie alla presenza di  $\text{H}_2\text{O}$  sono incompressibili quindi ideali anche per lubrificazione. Il ruolo è supporto, mezzo che conduce nutrimento, ecc.
- $\text{H}_2\text{O}$  strutturato.

Quindi, complessivamente la matrice extracellulare (ECM) è composta da proteine altamente collegate a GAG, insieme formano una rete polimerica che ha una grande affinità con acqua.

**Sostanza ground= acqua legata a proteoglicani forma una sostanza geliforme incompressibile**

Insieme il complesso proteoglicani e H<sub>2</sub>O strutturato e' noto come  
SOSTANZA GROUND  
(GROUND SUBSTANCE).

**Ground substance** is an amorphous gel-like substance in the extracellular space that contains all components of the [extracellular matrix](#) (ECM) **except for fibrous materials** such as [collagen](#) and [elastin](#).<sup>[1]</sup> Ground substance is active in the development, movement, and proliferation of tissues, as well as their metabolism. Additionally, cells use it for support, water storage, binding, and a medium for intercellular exchange (especially between blood cells and other types of cells). Ground substance provides lubrication for collagen fibers.<sup>[2]</sup>

The components of the ground substance vary depending on the tissue. Ground substance is primarily composed of water, [glycosaminoglycans](#) (GAGs) such as [hyaluronic acid](#), [heparan sulfate](#), [dermatan sulfate](#), and [chondroitin sulfate](#), [proteoglycans](#) which GAGs are bound to, and [glycoproteins](#). Components of the ground substance are secreted by [fibroblasts](#). Usually it is not visible on slides, because it is lost during staining in the preparation process

Alcuni GAG sono molto grandi, es ialuron che ha un PM di qualche 1 000 000

● globular protein (MW 50,000)

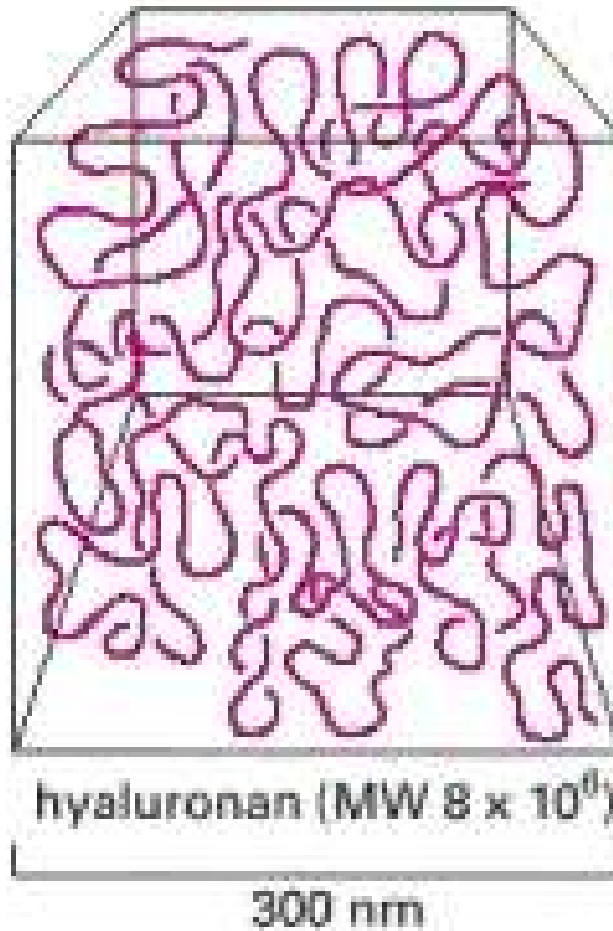


glycogen (MW ~ 400,000)

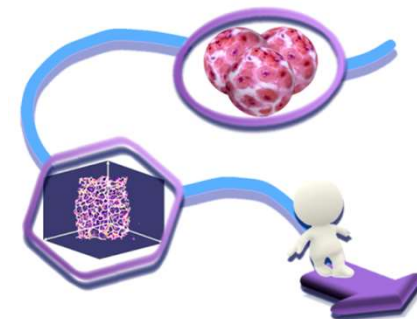


spectrin (MW 460,000)

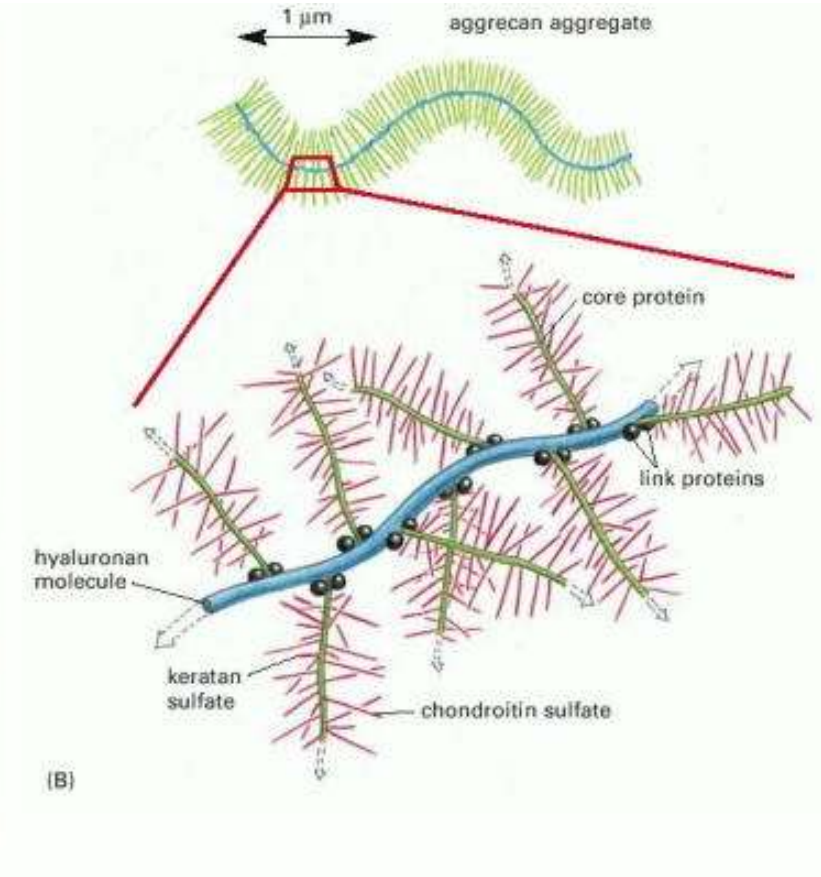
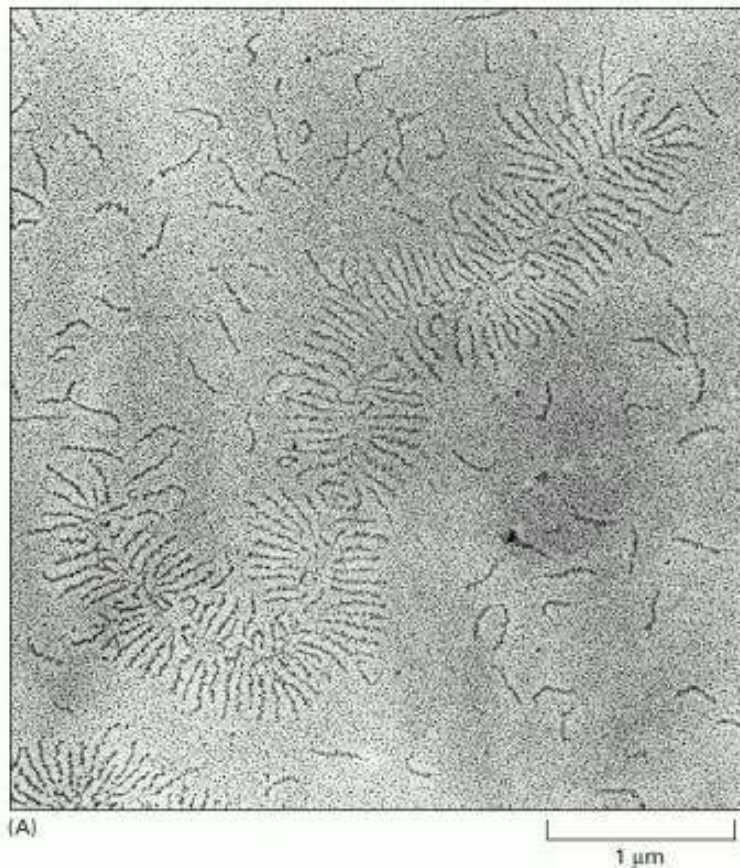
collagen (MW 290,000)



Molto idrato

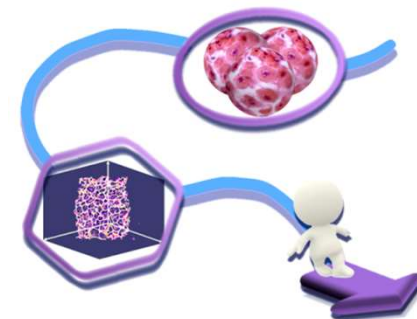


Sostanza ground: acqua legata a proteoglicani forma una sostanza geliforme incompressibile



Aggrecan e' la PG che si trova nella cartilagine

*Proteoglycans are a major component of the animal extracellular matrix, the "filler" substance existing between cells in an organism. Here they form large complexes, both to other proteoglycans, to hyaluronan, and to fibrous matrix proteins, such as collagen.*



# Riassunto

- Sostanza ground= acqua+PG.

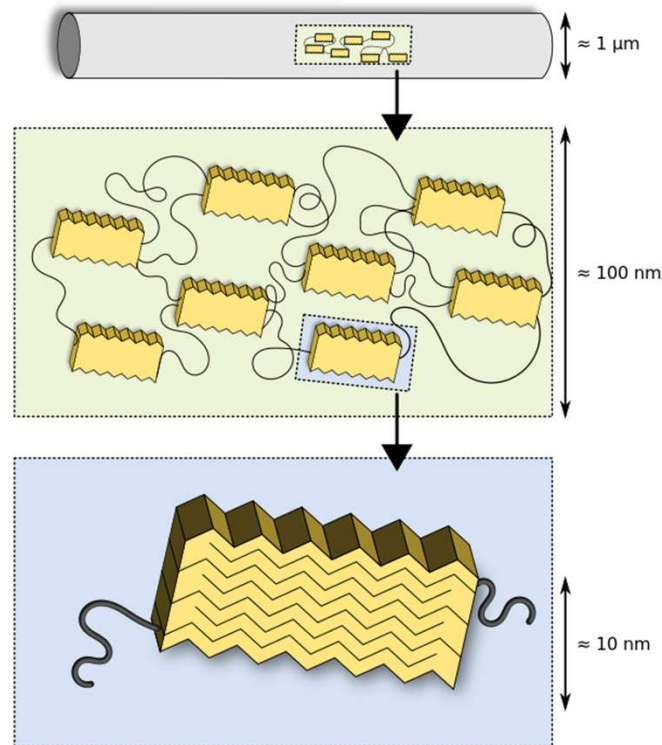
E' la sostanza riempitiva dei tessuti connettivi che dona le proprieta' di incomprimibilita' ai tessuti. Ovviamente e' importante per l'integrita' e la funzione cellulare.

- PG=GAG+protein (proteina glicosata)

Formato da una core proteina con diversi GAG e piccolo proteine. Struttura "bottle brush". Elevata affinita' con acqua.

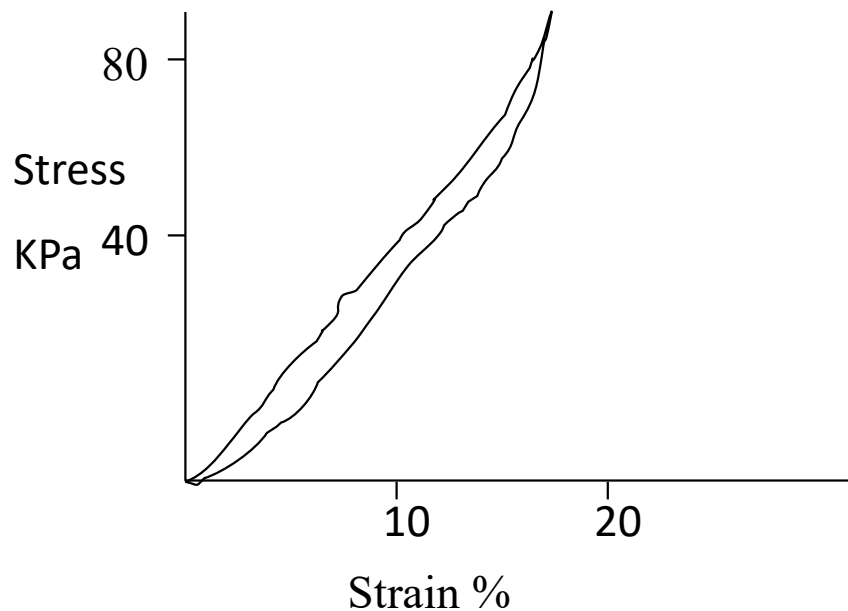
# Proteine strutturali

- Seta
- Cheratina
- Collagene
- Ragnatella
- Actina
- Elastina

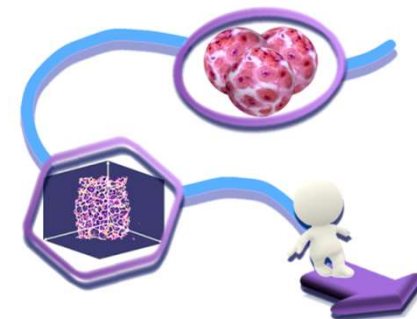


Collagene and elastina, 2 solidi bioviscoelastici.

**Elastina** è uno dei materiali più elastici nel mondo biologico. La sua curva stress strain è quasi lineare con pochissimo isteresi ed è elastico fino a deformazioni di 160%. E' una proteina che si trova nei polmoni nella pelle, parete arteriose e venose e il cuore. Non viene espressa dopo l'adolescenza, molto resistente alla degradazione termica e in teoria dura una vita nel organismo (emi vita=78 anni)



L'elastina non si trova facilmente nella forma pura, è sempre con collagene. La forma più pura si trova nel ligamentum dei animali ungulati dove tiene il collo verticale a un costo energetico basso (*perchè?*)





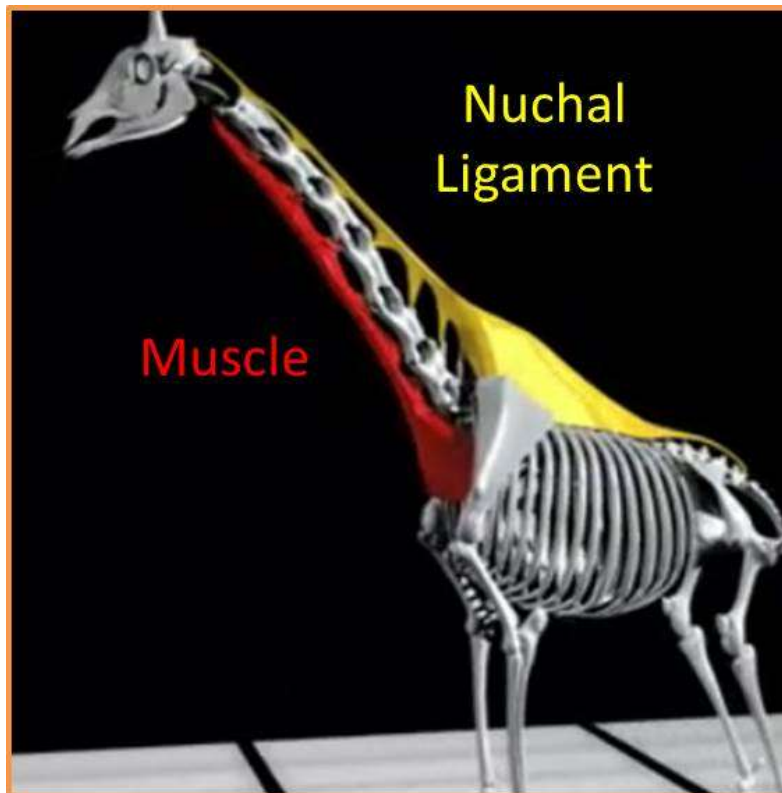


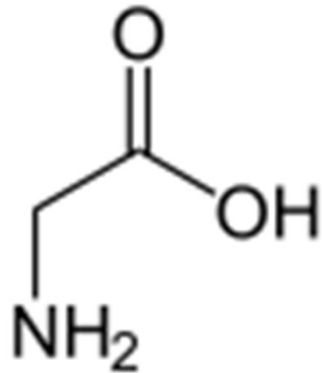
Table 2

Amounts of elastin in dry mass of human and bovine (\*) tissues.

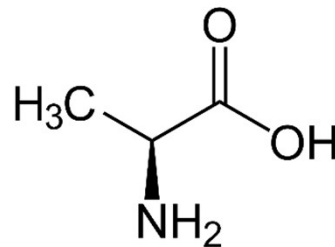
	Elastin Amount (%)	References
Nuchal ligament *	~70	[22,55]
Large arteries	>50	[10]
Yellow ligament	~47	[56]
Saphenous vein	~32	[57]
Lung parenchyma	20-30, ~30	[52,58]
Auricular cartilage *	19, 20	[51,59]
Auricular cartilage	15	[60]
Heart valves	10-15	[55]
Pulmonary blood vessels	7-16	[52]
Mitral valve chordae tendineae	~5	[61]
Airways	3-5	[52]
Skin	2-4, 3-4	[10,62]
Nasal cartilage	3-5	[60]
Intervertebral disc	1.7, 2	[56,63]
Meniscus	0.6	[59]

# Elastina

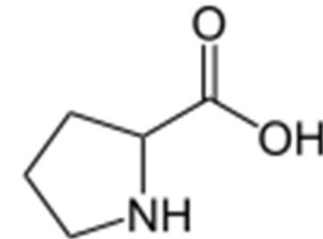
- Contiene molta glicina, alanine e prolina



30%

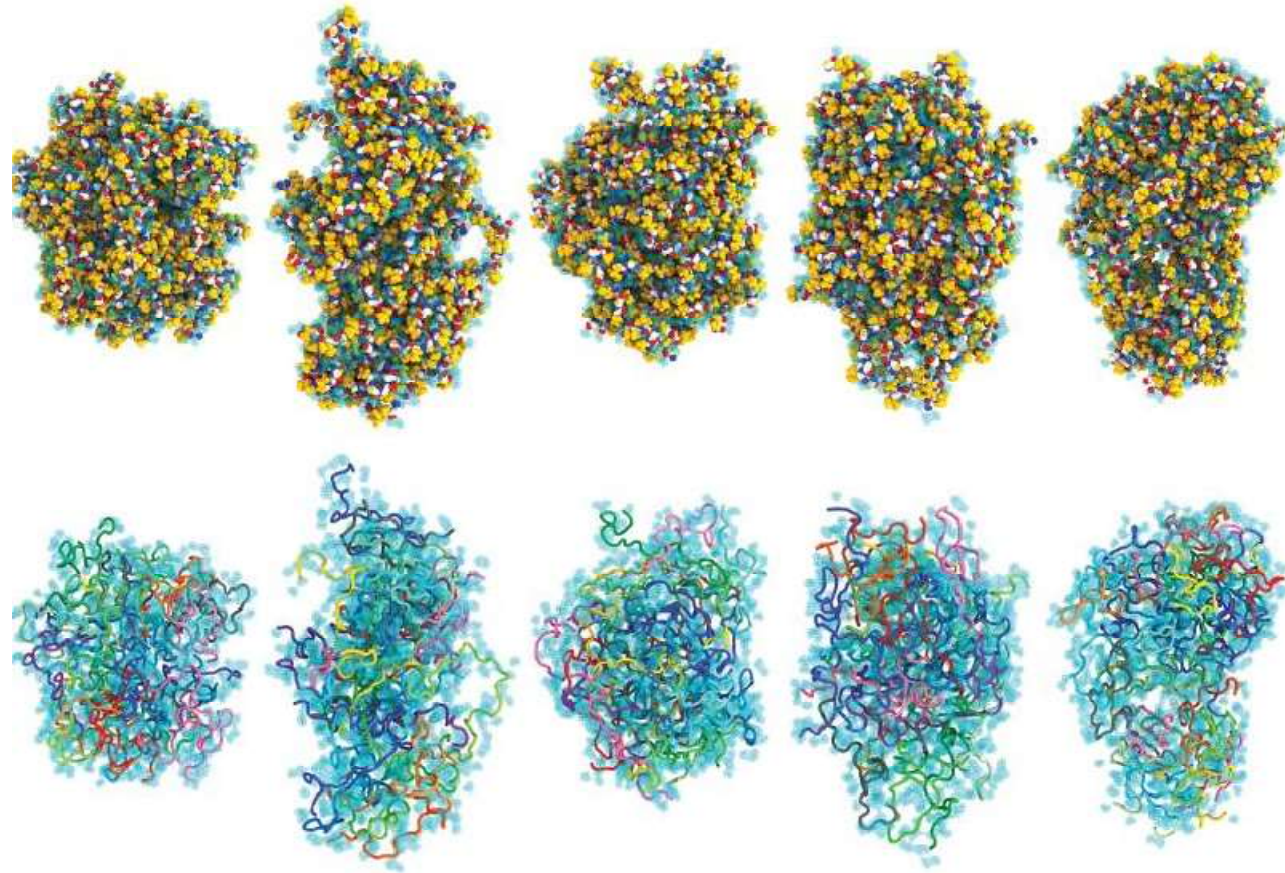


23-25%



12%

Elastin is abundant in elastic tissues, and tissues rich in elastin include the aorta and major blood vessels (28–32% dry mass), the lungs (3–7%), elastic ligaments (50%), tendons (4%), and the skin (2–3%). Elastin and elastic fibers are also found within liver and myocardial tissues. Structurally, elastic fibers are primarily composed of extensively crosslinked elastin (>90%) and microfibrils rich in acidic glycoproteins and are organized into 8–16 nm bead-like fibrils of beaded appearance.



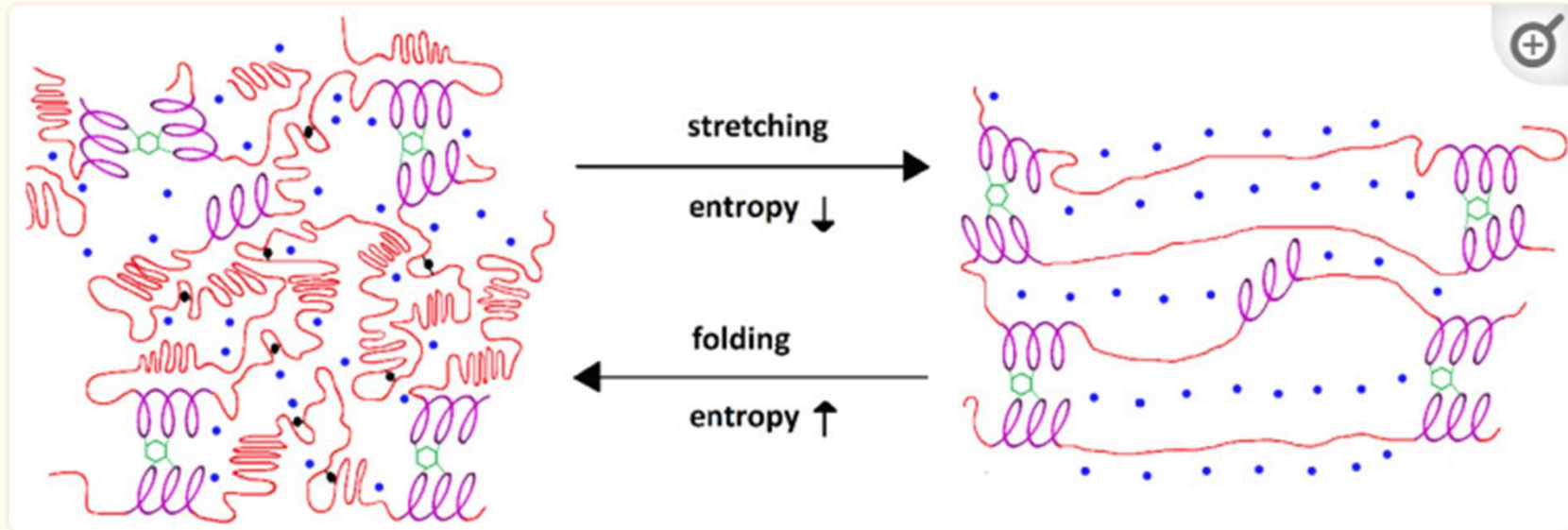
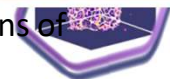


Figure 1

Simplified model of hydrated crosslinked elastin; helical, hydrophilic domains of polypeptide chains (magenta), cross-linking between helical domains (green), hydrophobic domains (red), peptide-peptide hydrogen bonds (black), solvating water (blue). Folded, native state (left side)—Prolines and glycines prevent the hydrophobic collapse of the hydrophobic domains, which allows water molecules to spread among the elastin network; interactions of the solvent water molecules with water bound to the main chain allow for the chain mobility and result in transient hydrogen-bonded turns as short and labile folded structures. Extended state (right side)—Extension of elastin leads to a decrease of conformational entropy of the polypeptide chains and increases hydrophobic interactions with exposed hydrophobic residues; both the hydrophobic effect and conformational entropy of the chain drive the elastic recoil of stretched elastin molecules.

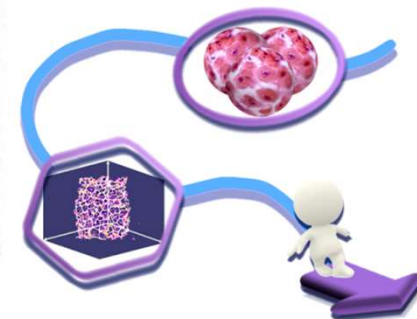
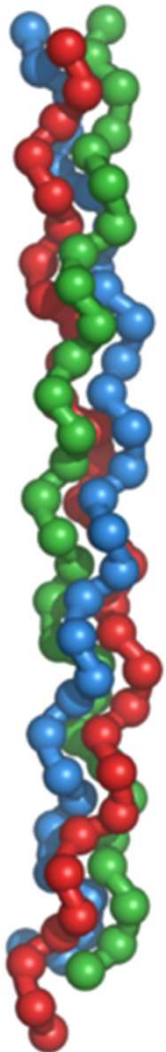


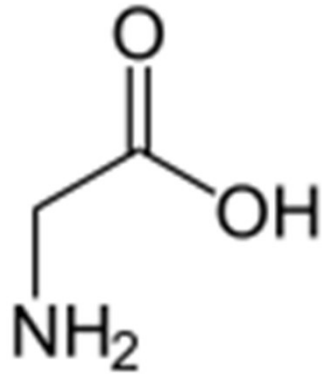
# Collagene

Collagene la più ubiquita proteine nel corpo (25%-35% delle proteine). E' l'elemento strutturale di base e supporta cariche nella pelle, vasi, tendini, legamenti, cornea, ossa ecc. Ha un importanza nel nostro organismo quanto l'acciaio nel mondo tecnologico. E' molto conservato (posseduto da tutti organismi multicellulari)

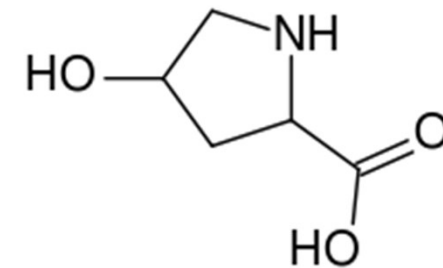
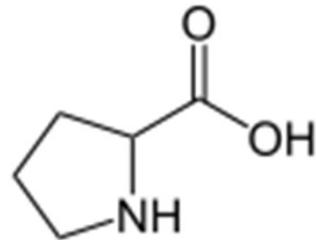
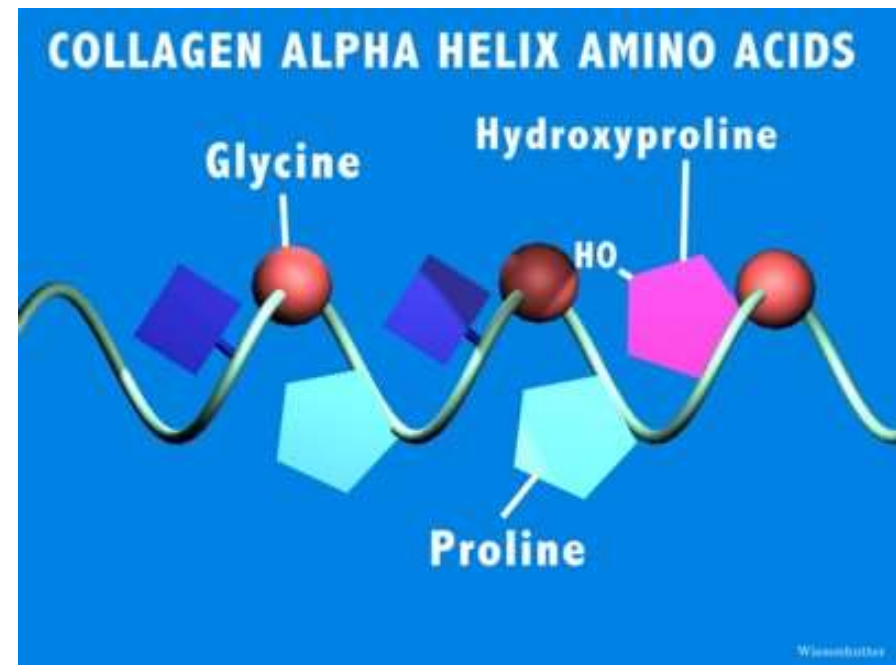
E' la sua struttura è organizzazione 3D che conferisce le proprietà meccaniche. Come nella maggior parte di proteine strutturali (cheratina, seta, actina) ha una sequenza amino acida ripetitiva: Ogni terzo residuo è la glicina e la prolina e l'idrossiprolina spesso si trovano insieme. Confrontiamo i contenuto AA nel collagene e elastina

Amminoacido	Collagene (quantità %)	Elastina (quantità %)
glicina (GLY)	~ 35	~ 27
alanina (ALA)	~ 11	~ 23
valina (VAL)	< 3	~ 17
prolina (PRO)	~ 12	~ 12
leucina (LEU)	< 3	~ 12
idrossiprolina (HYP)	~ 9	-
altro	~ 33	~ 9





GLY sta  
dove il  
raggio di  
curvatura  
è minimo



Circa 28 tipi di collagene sono state identificate, le differenze dipendono dal contenuto AA e sequenza, che cambia la configurazione delle fibre.

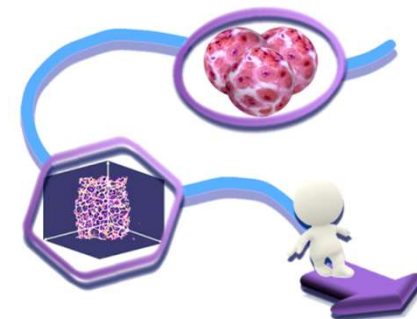
Tipo I è il classico fibrillare (tendini, pelle..)

Tipo II si trova nella cartilagine

Tipo III fibre reticolari

Tipi IV nella lamina basale e nella lente (non fibrillare)

Collagene ha un organizzazione diversa nei diversi tessuti. Il piu' commune e' senz'altro tipo I (90%)



Ribosomes

Golgi bodies

Ec environment

Synthesis of collagen

Chains



Procollagen



Tropocollagen



Fibril



Microfibrille interdigitate

Fibre

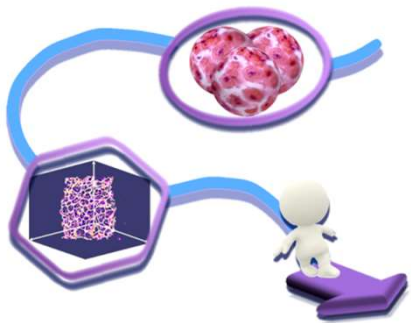
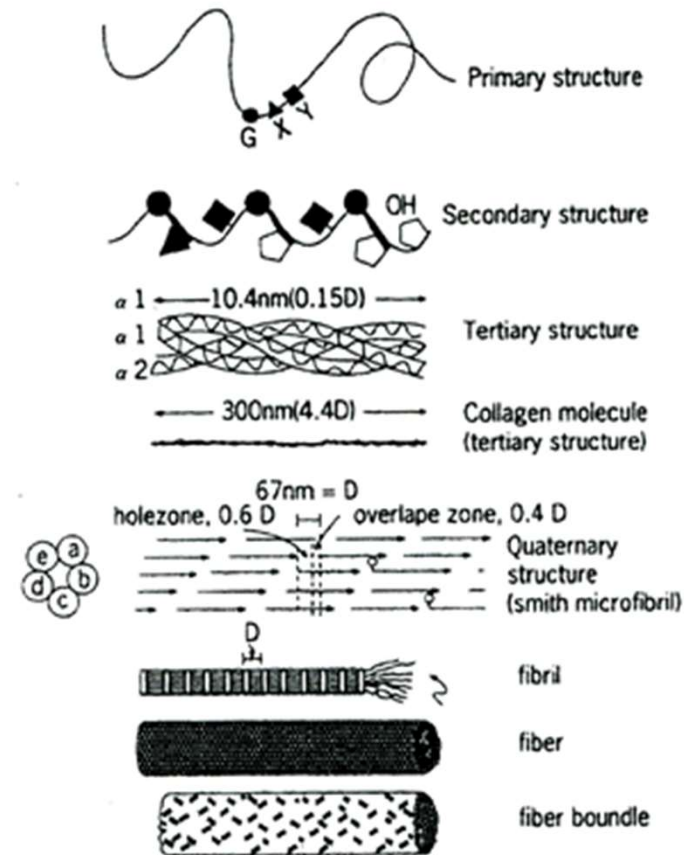


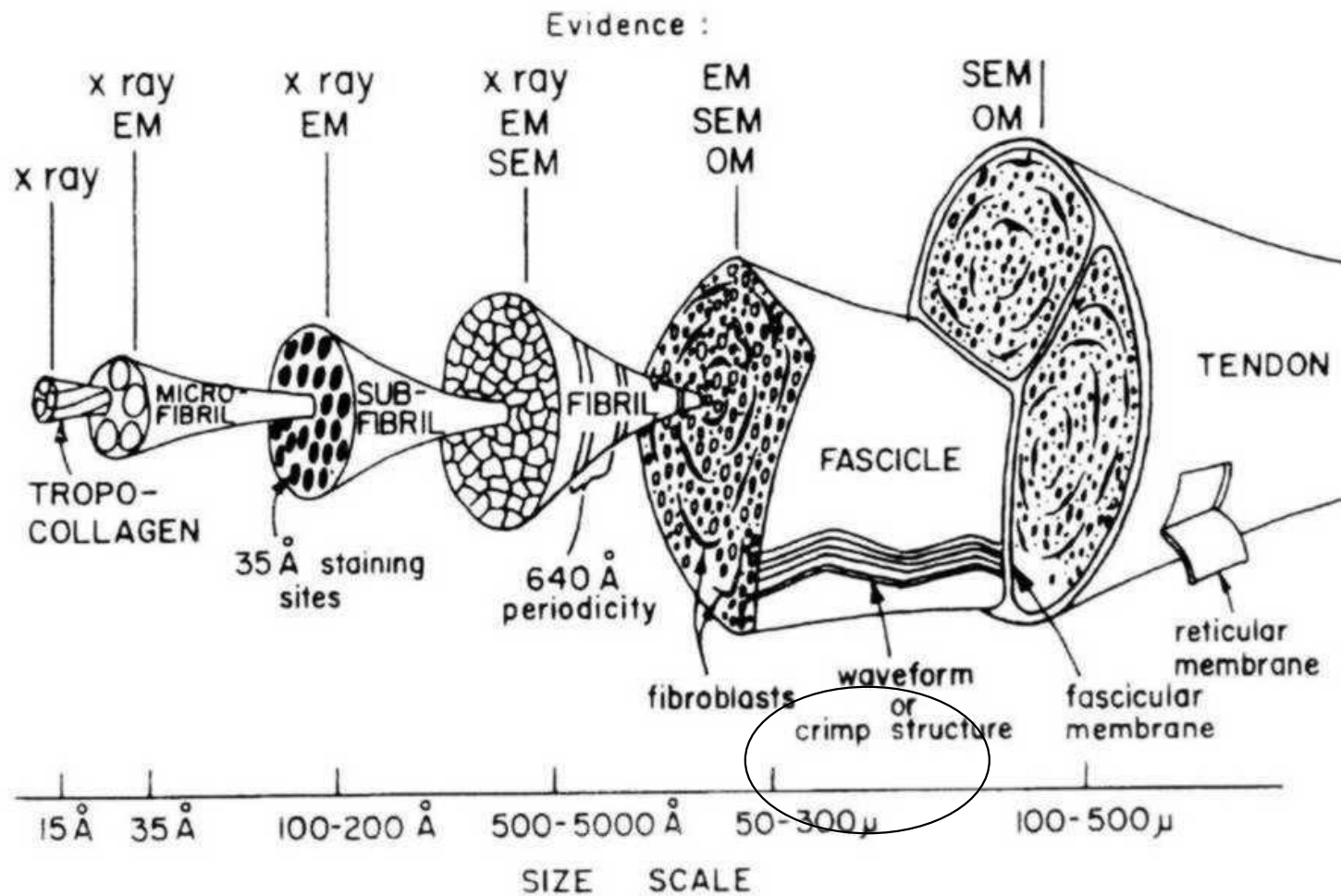


# Struttura di collagene

Nel citoplasma si forma la tripla elica di procollagene.

Tre catene AA si intrecciano per formare una tripla elica. Fuori dalla cellula questa collezione di molecole si auto assembla per formare tropocollagene (circa 5 triple eliche) e le microfibrille di collagene. Insieme di microfibrille formano subfibrille e poi fibrille. Le fibrille hanno un caratteristico pattern striato che risulta dal assemblaggio ordinato di molecole. Quello che si vede sotto microscopio sono fibre di collagene (100-300 micron). Per la formazione di collagene e' necessario la vitamina C.



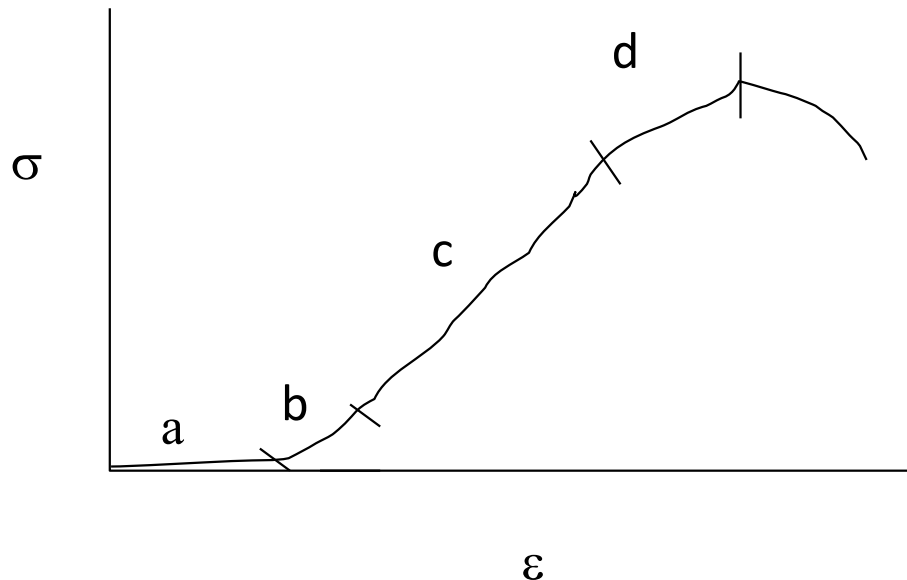


Organizzazione del tendine (quasi tutto collagene): la struttura ondulata è dovuto a fibre pieghate. L'unità meccanica di un tendine sono queste fibre. L'angolo della piegha diminuisce quando le fibre vengono tirate. Si pensa che la struttura pieghata e' causata da prestress delle fibre e interazione con la MEC.

Nel collagene, la stress avviene attraverso un aumento di **energia interna (non entropia)** quando le fibre vengono deformate..

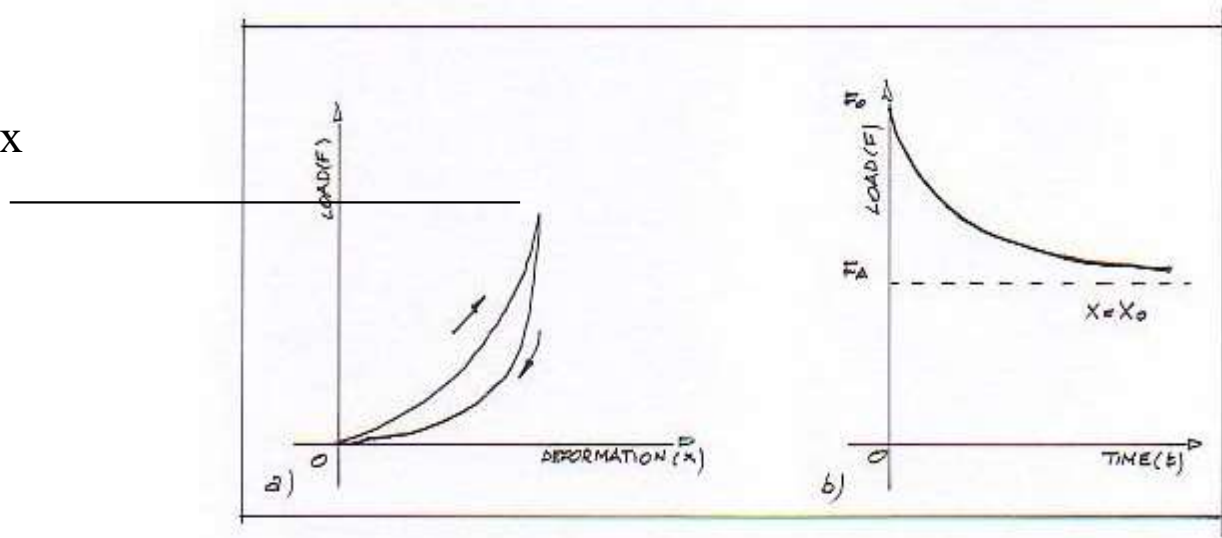
Questa e' una tipica curva stress-strain per un tendine.

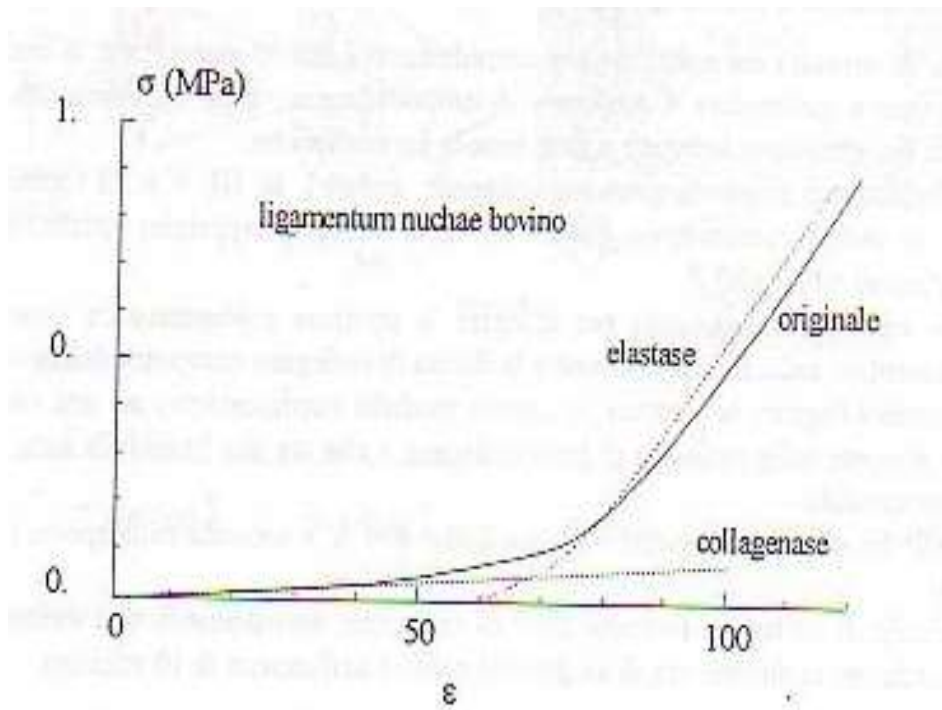
- a=La prima parte della curva e' dovuto all'esplorazione dell'acqua. Non sempre appare nei grafici
- La seconda zona e' la zona fisiologica, in cui le sollecitazioni sono molto basse. Lo stress aumenta in maniera esponenziale fino a circa 3%. Ci vuole poca forza perche all'inizio perche diminuiscono le ondulazioni, poi aumenta .
- La terza zona e' quella di reclutamento. Puo' essere considerato circa lineare (ma modulo elastico piu' alto della zona b) con un modulo elastico di circa 1-2 GPa
- In fine la zona non lineare plastica, con rottura a circa 15%  $\epsilon$ , 50-150MPa .



Collagene e' un materiale tipicamente viscoelastico : stress relaxation, isteresis e sforzo dipendono dalla velocità di deformazione

1/3 max



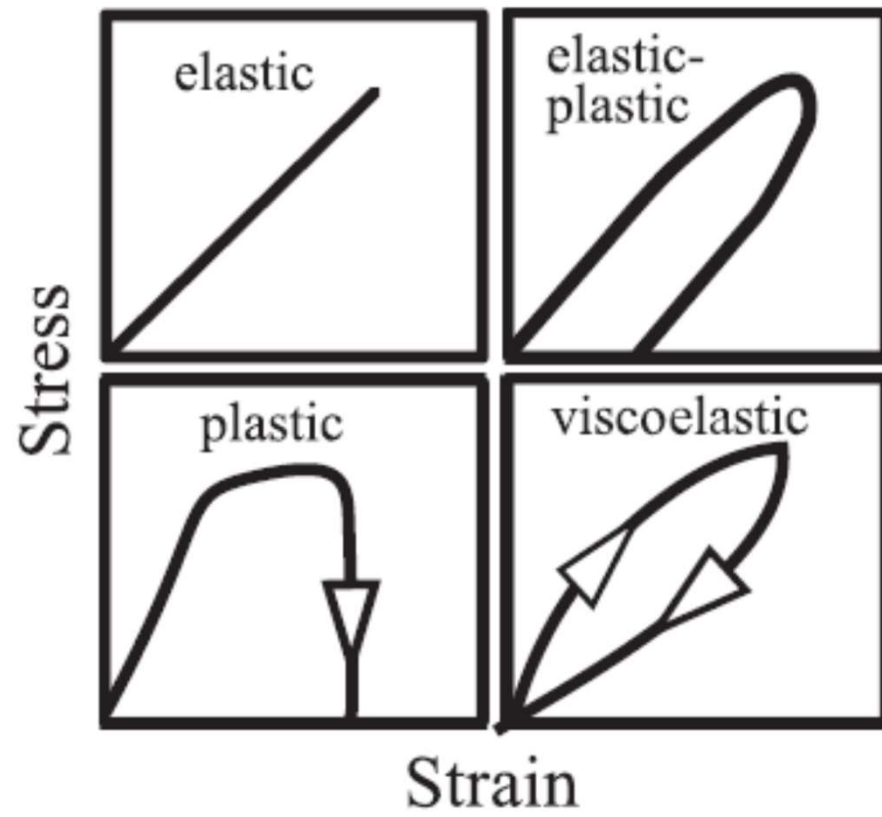


Collagene e elastina spesso si trovano insieme, ed e' la loro interazione che da luogo alle proprieta' viscoelastiche del tessuto connettivo biologico.

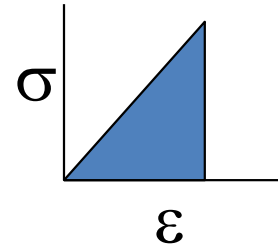
Il grado di viscoelasticita' dipende dalle quantita' relative di collagene, elastina e sostanza ground.

Un tipico legamento puo essere digerito con elastase e collagenase per rivelare le proprieta' meccaniche diverse di ogni proteina.

	Elastic modulus, MPa	Breaking stress, MPa	Breaking strain, %	Elastic limit, %
Collagen	2000	50-100	10	1-2
Elastin	0.6	1	100	60



Materiale elastico

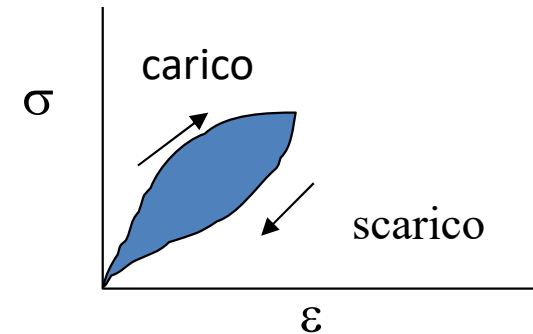


$$\int_0^{\varepsilon_f} \sigma_{load} d\varepsilon - \int_0^{\varepsilon_f} \sigma_{unload} d\varepsilon \neq 0 \quad \text{viscoelastico}$$

$$\int_0^{\varepsilon_f} (\sigma_{load} - \sigma_{unload}) d\varepsilon = 0 \quad \text{elastico}$$

Materiale Viscoelastico

$$\int_0^{\varepsilon_f} (\sigma_{load} - \sigma_{unload}) d\varepsilon > 0 = H$$



H=entalpia  
per unità di  
volume

L'area tra le due curve è proporzionale alla viscosità e rappresenta la differenza tra l'energia applicata per deformare e l'energia rilasciata nella forma di calore durante il rilassamento= energia dissipata.

## Viscoelasticità

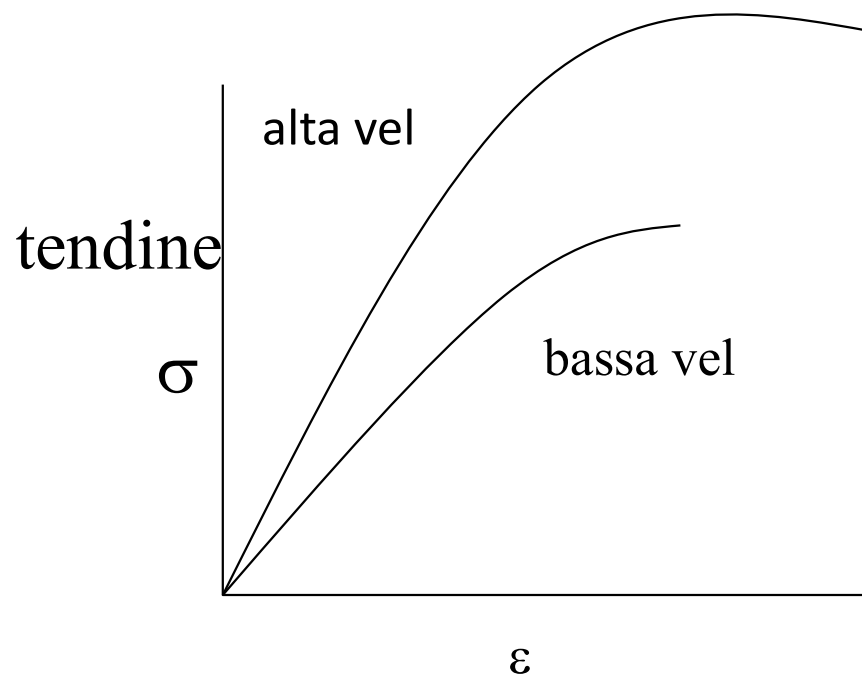
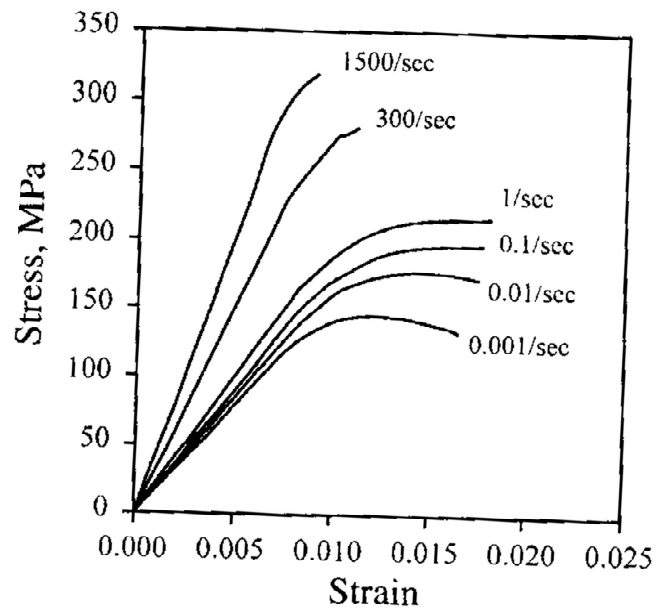
Viscoelasticità è un fenomeno che dipende dal tempo. Più viscoelastico è un materiale, più assomiglia un liquido. La risposta di un materiale dipende dalla velocità della deformazione

La viscoelasticità è misurato usando:

- Histeresi : ciclo di carico e scarico
- Creep :rilassamento della deformazione (come  $\epsilon$  varia con  $t$ ), applichiamo uno sforzo costante e osserviamo la deformazione
- Stress relaxation:rilassamento dello stress (come  $\sigma$  varia con  $t$ ), applichiamo una deformazione e misuriamo la forza o carico che il materiale riesce a sostenere.
- Epsilon dot: sforzo sviluppato (nel tempo) sotto un velocità' di deformazione costante
- Sigma dot: deformazione nel tempo quando la velocità' di applicazione di sforzo e' costante
- **risposta meccanica a sollecitazioni sinusoidali che e' frequenza dipendente**

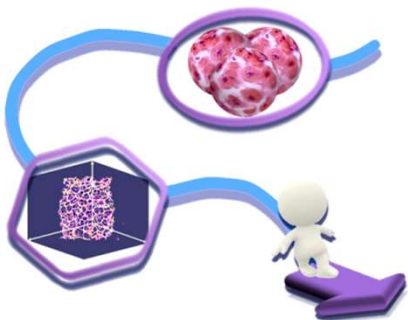
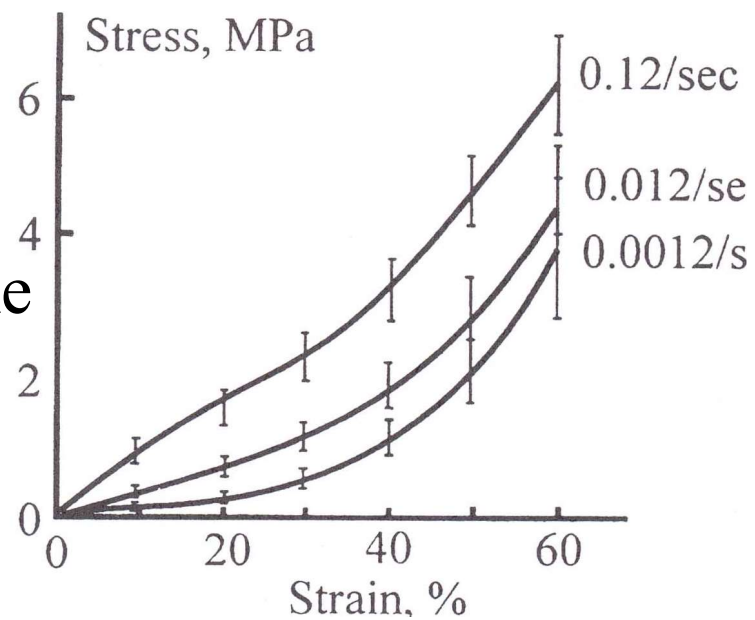
**=Analisi dinamica meccanica (DMA) –analisi meccanica a sollecitazioni sinusoidali**





*Stessa area, diverso l'energia*

cartilagine



# T\_relaxation and T\_retardation

- Relaxation time SR
- Retardation time CREEP

For a strain input, we define a relaxation time ( $t_{\text{relax}}$ ), which is the time in which the stress decays to  $1/e$  ( $\approx 37\%$ ) of the initial stress. For a stress input, the retardation time ( $t_{\text{retard}}$ ) is defined as the time necessary to reach  $\approx 63\%$  ( $1 - 1/e$ ) of the equilibrium strain

# Deborah number

“Le montagne si scioglieranno davanti al Signore, Dio di Israele ” - Libro dei Giudici (5,-5)

“But Deborah knew two things. First, that the mountains flow, as everything flows. But, secondly, that they flowed before the Lord, and not before man, for the simple reason that man in his short lifetime cannot see them flowing, while the time of observation of God is infinite.”  
M.Reiner, The Deborah Number, Physics today, 62 (1964)

The perception of a material is dependent on **observation time**.

$$De = \frac{\tau}{t} \left\{ \begin{array}{ll} De \gg 1 (\tau_{SR} \gg t) & \text{Slow response (solid like materials)} \\ De \ll 1 (t \gg \tau_{SR}) & \text{Instantaneous response (liquid like materials)} \\ De \approx 1 (\tau_{SR} \approx t) & \text{Intermediate response (viscoelastic materials)} \end{array} \right.$$

IMPORTANTE: VANNO CONFRONTANTI MATERIALI CON LO STESSO TAU CAMBIANDO TEMPO SPERIMENTALE OPPURE OPPURE DIVERSI MATERIALI OSSERVATI NELLO STESSO TEMPO

# Deborah number

- $D = \text{time of relaxation} / \text{time of observation}$
- For example, for a Hookean elastic solid, the relaxation time  $t_c$  will be infinite and it will be zero for a Newtonian viscous fluid.
- *Deborah knew two things. First, that the mountains flow, as everything flows. But, secondly, that they flowed before the Lord, and not before man, for the simple reason that man in his short lifetime cannot see them flowing, while the time of observation of God is infinite. We may therefore well define a nondimensional number, the Deborah number,  $De = \text{time of relaxation} / \text{time of observation}$ .* Thus, when  $De \rightarrow \infty$ , the material is expected to show an elastic-solid behaviour; while, when  $De \rightarrow 0$ , the material will behave as a viscous liquid. Materials that show both fluid-like and solid-like characteristics on human-observable time scales (i.e. relaxation and observation time are comparable) are defined as viscoelastic.