
Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica

Corso di Biomeccanica

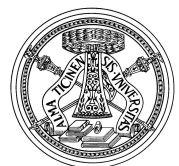
Parte 7: legami costitutivi

F. Auricchio

auricchio@unipv.it

<http://www.unipv.it/dms/auricchio>

Università degli Studi di Pavia
Dipartimento di Meccanica Strutturale



Tessuti biologici

Pietrabissa cap 4 .

Tessuti molli

Tessuti molli: generalmente costituiti in gran parte da collagene + elastina (+ polisaccaridi)

Collagene

- E' una proteina strutturale organizzata sotto forma di fibra
- Ne esistono diversi tipi, i quali, nei tessuti dei mammiferi, formano fibre che si trovano nella pelle, nei tendini, nelle cartilagini e nei tessuti cardiovascolari
- Fibre di collagene hanno lo scopo di limitare le deformazioni (massime) dei tessuti e di prevenirne le rotture meccaniche
- Fibre di collagene sono molto stabili chimicamente ed hanno alti valori delle proprietà meccaniche

Collagene

- La particolare struttura delle fibre di collagene è responsabile del comportamento meccanico
 - Arrangiamento elicoidale di catene proteiche
 - Legami intramolecolari

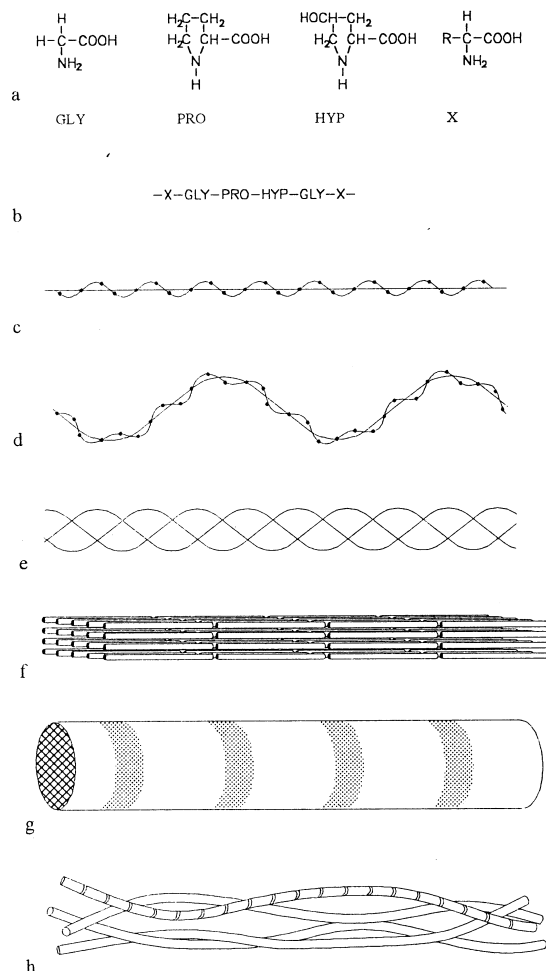
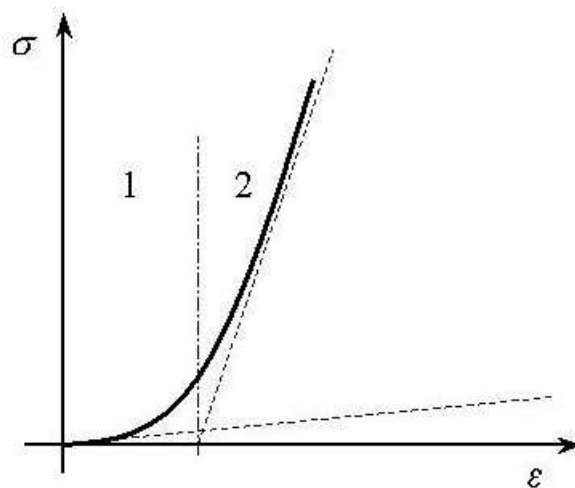


Figura 4.18 *Struttura del collagene. a: amminoacidi; b: catena molecolare; c: singola elica; d: singola elica avvolta; e: tripla elica avvolta; f: minifibrille; g: fibrilla di collagene; h: fibre di collagene.*

Collagene

- Nella prima parte dell'allungamento a trazione le fibre di collagene abbiano una modesta capacità di sopportare i carichi
- All'aumentare dell'allungamento le fibre ruotano e si rettilinearizzano \Rightarrow modificano la geometria spaziale da una forma elicoidale ad una forma lineare spaziale
- Quando le catene proteiche sono distese entrano in gioco i legami intra e intermolecolari \Rightarrow le proprietà meccaniche aumentano



- **Regione 1:** comportamento elastico con basso modulo elastico (svolgimento delle catene)
- **Regione 2:** comportamento elastico con elevato modulo elastico

Tessuti molli: elementi componenti

	Modulo di elasticità [MPa]	Sforzo a rottura [MPa]	Allungamento a rottura [%]	Limite elastico [%]
Collagene [Tratto 2]	1000	50-100	10	1-2

Elastina

- E' anch'essa una proteina strutturale
- Si trova in gran quantità nei cosiddetti tessuti elastici, quali certi legamenti, le pareti arteriose, la pelle, etc.
- Grazie ai legami tra le catene proteiche ha un'altissima elasticità ed in genere proprietà meccaniche inferiori rispetto a quelle del collagene (relativamente al tratto 2 del collagene) [vedi tabella]

	Modulo di elasticità [MPa]	Sforzo a rottura [MPa]	Allungamento a rottura [%]	Limite elastico [%]
Collagene [Tratto 2]	1000	50-100	10	1-2
Elastina	0.6	1	100	60

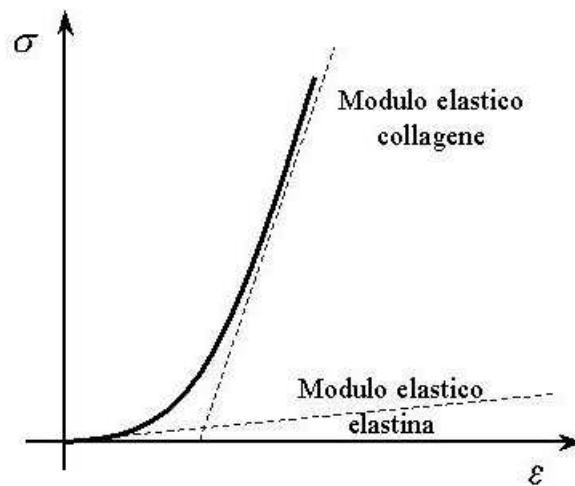
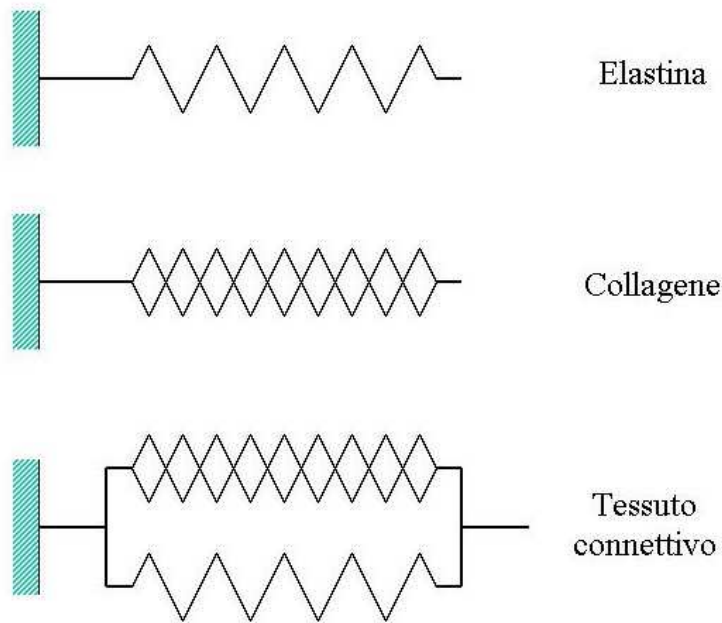
Tessuti molli: elementi componenti

Polissacaridi

- Altro costituente dei tessuti molli
 - Polimeri formati da zuccheri semplici
 - Interagiscono con le proteine, formando molecole che si legano facilmente con l'acqua e con altri gruppi grazie alla loro reattività
 - Si comportano come materiali altamente viscosi
-
- Comportamento viscoso: risposta meccanica è funzione della velocità di carico

Tessuto connettivo

collagene + elastina



- Tessuti ricchi di collagene
- Tessuti elastici

Tessuti ricchi di collagene

- Pelle, tendini, cartilagini, tessuti vascolari, etc.
- Svolgono in parte anche funzioni speciali (trasparenza lenti degli occhi, forma orecchie o punta naso, etc.)
- Possono essere considerati materiali compositi di tipo polimerico con fibre di collagene orientate immerse in una matrice di polisaccaridi e di elastina amorfa
- Scaldando il tessuto aumenta il volume specifico (diminuisce la densità) [temperatura di transizione vetrosa è $T_g \approx 40^\circ\text{C}$ ed oltre i 56°C il tessuto si denatura]
- ★ Risposta meccanica di tessuti ricchi di collagene (quali tendini, legamenti) è del tipo:

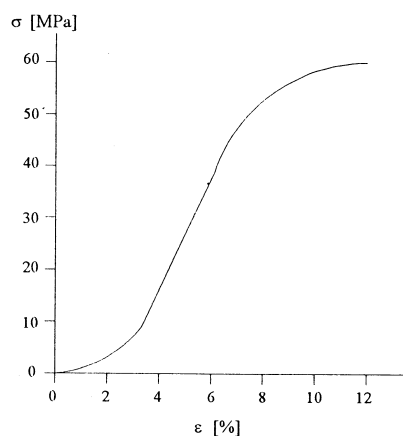


Figura 4.23 Tipica curva sforzo-deformazione a trazione di un tendine (da: BJ Rigby, N Hiraci, JD Spikes et al. 'The Mechanical Properties of Rat Tail Tendon', *J. Gen. Physiol.*, 43, pp. 265-283, 1959).

Tessuti ricchi di collagene

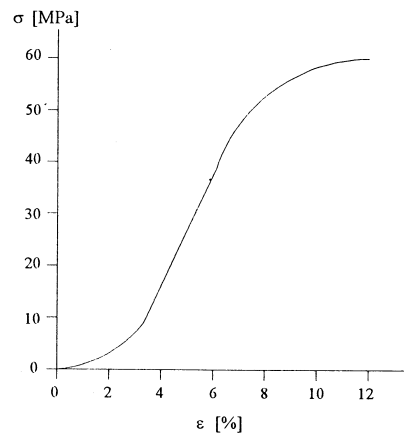


Figura 4.23 Tipica curva sforzo-deformazione a trazione di un tendine (da: BJ Rigby, N Hiraci, JD Spikes et al. 'The Mechanical Properties of Rat Tail Tendon', J. Gen. Physiol., 43, pp. 265-283, 1959).

- *Prima parte della curva:* progressivo incremento della pendenza \Rightarrow allineamento fibre di collagene
- *Seconda parte della curva:* tratto rettilineo \Rightarrow effettiva deformazione delle fibre di collagene
- *Terza parte della curva:* progressiva riduzione della pendenza \Rightarrow progressiva rottura dei legami tra le singole fibre e rottura delle singole fibre fino alla rottura dell'intero tessuto
- Pendenza massima della curva = 1 GPa, valore che coincide con il modulo di elasticità di una fibra di collagene
- A causa delle proprietà viscosi dei componenti, la risposta meccanica del tessuto dipende dalla velocità di carico

Tessuti ricchi di collagene

- **Tendini:**

estremità con le quali i muscoli si connettono ai segmenti ossei o al derma per trasmettere forze o imporre cinematismi

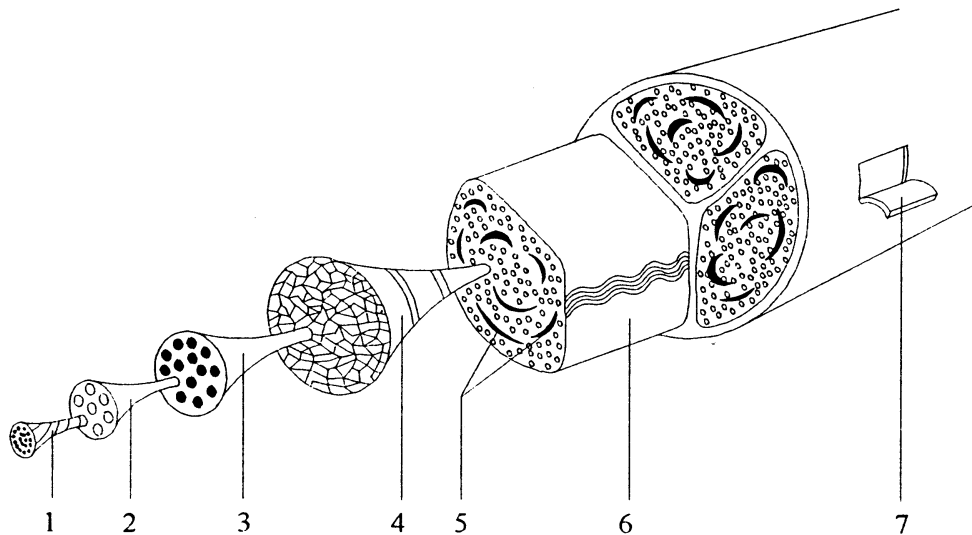


Figura 4.24 Rappresentazione schematica della struttura gerarchica del tendine. 1: tropocollagene; 2: microfibrilla; 3: subfibrilla; 4: fibrilla striata; 5: fibroblasti (cellule); 6: fascio; 7: guaina.

- **Legamenti:**

strutture che determinano l'unione di due o più segmenti ossei o cartilagini (vincoli cinematici)

Tessuti ricchi di collagene

- **Pelle:**

- membrana continua che riveste il corpo
- svolge funzioni protettive, di scambio termico e di percezione tattile
- struttura complessa ed uno spessore che varia da 0.5-1 mm sulle palpebre fino a 4-5 mm sul palmo della mano o sulla pianta del piede

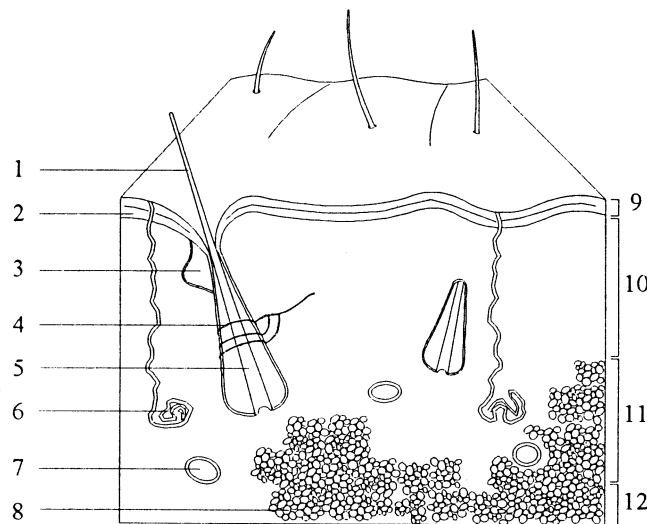


Figura 4.25 Rappresentazione schematica della pelle. 1: fusto del pelo; 2: strato corneo; 3: ghiandola sebacea; 4: terminazione nervosa; 5: bulbo del pelo; 6: ghiandola sudoripara; 7: vaso sanguigno; 8: lobuli di grasso; 9: epidermide; 10: derma; 11: tessuto sottocutaneo; 12: tessuto connettivo.

Tessuti ricchi di collagene

- **Pelle:**

- Comportamento meccanico anisotropo

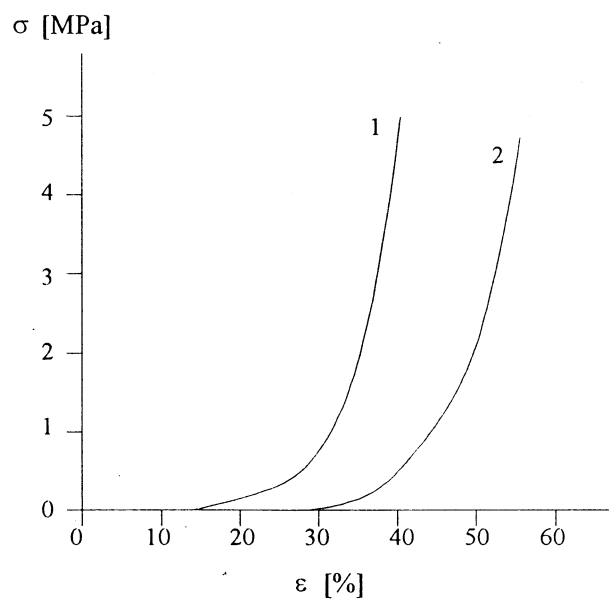


Figura 4.26 *Caratteristica meccanica della pelle addominale umana in direzione perpendicolare (1) e parallela (2) all'asse cranio-caudale (da: CH Daly 'The Biomechanical Characteristics of Human Skin' Ph.D. Thesis, University of Strathclyde, Scotland, 1966).*

- **Cartilagine:**

- Tessuto con due funzioni:
 - ★ mantenere le forme (orecchio, punta del naso, etc.)
 - ★ rivestimento delle superfici articolari per ridurre l'attrito durante i movimenti

Tessuti elastici

- Vasi sanguigni, alcuni legamenti, muscoli
- Principale costituente è l'elastina
- Comportamento meccanico

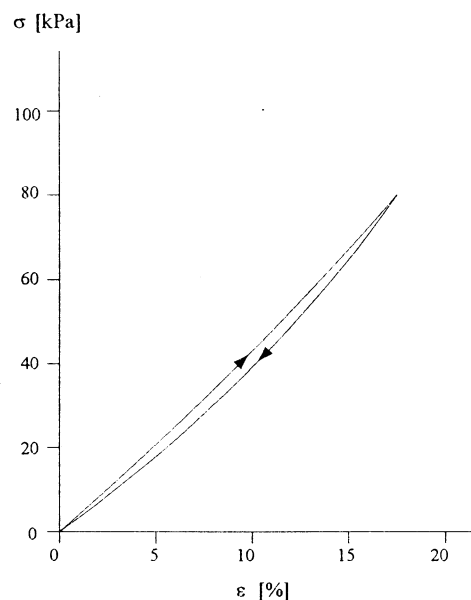


Figura 4.27 Comportamento meccanico dell'elastina durante un ciclo di sollecitazione (da: YC Fung 'Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues', Springer-Verlag, Berlin, 1981).

- modulo elastico molto basso rispetto al collagene
- risposta elastica dell'intero tessuto
- energia dissipata molto bassa

Tessuti elastici

- tessuti per i quali è richiesta un'ampia deformazione con ripristino delle dimensioni originali dopo la rimozione del carico
- tessuti sottoposti a sollecitazioni cicliche
- **Vasi sanguigni** (in particolare i vasi arteriosi):
 - sono soggetti a variazioni cicliche della pressione sanguigna
 - costituiti da tre strati concentrici: intima, media, adventizia

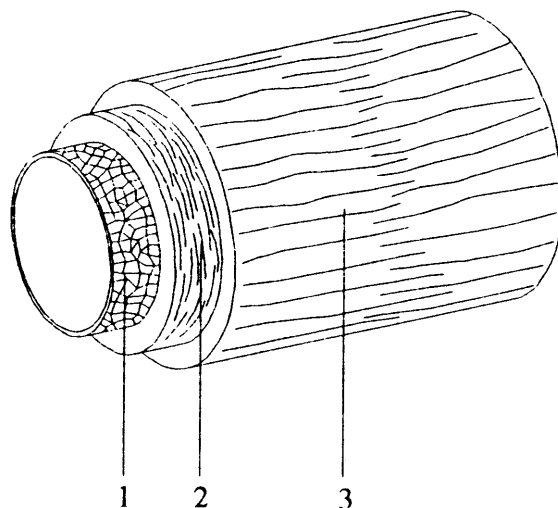
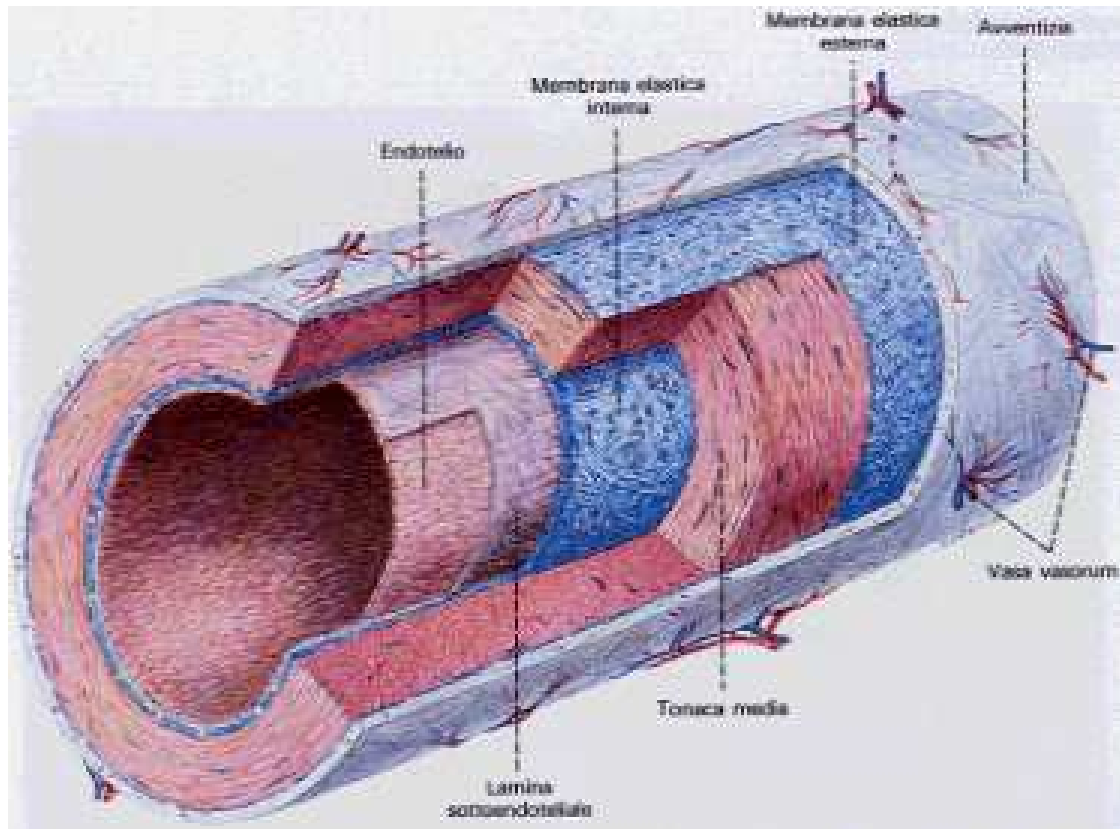


Figura 4.28 *Struttura di un vaso arterioso.*
1: tunica intima; 2: tunica media; 3: tunica adventizia.

Vasi sanguigni



Vasi sanguigni

- **Intima:**

- ★ strato di cellule endoteliali, a contatto diretto con il sangue
- ★ sottile strato subendoteliale contenente fibre di collagene

- **Media:**

- ★ in generale è lo strato con maggiore spessore e con struttura differente nelle diverse parti del sistema vascolare (→ funzione del vaso)
- ★ **Grandi arterie** (prossime al cuore):
 - lamine elastiche fenestrate, alternate a strati di tessuto connettivo, fibre di collagene e fibre muscolari lisce
 - prendono il nome di arterie elastiche per l'elevato contenuto di elastina nella media
 - Ruolo: accumulare sangue durante la sistole cardiaca (fase di eiezione ventricolare) e di espellerlo durante la successiva diastole (fase di riempimento vascolare) smorzando in tal modo parte della pulsatilità del flusso generato dal cuore

Ruolo grandi arterie

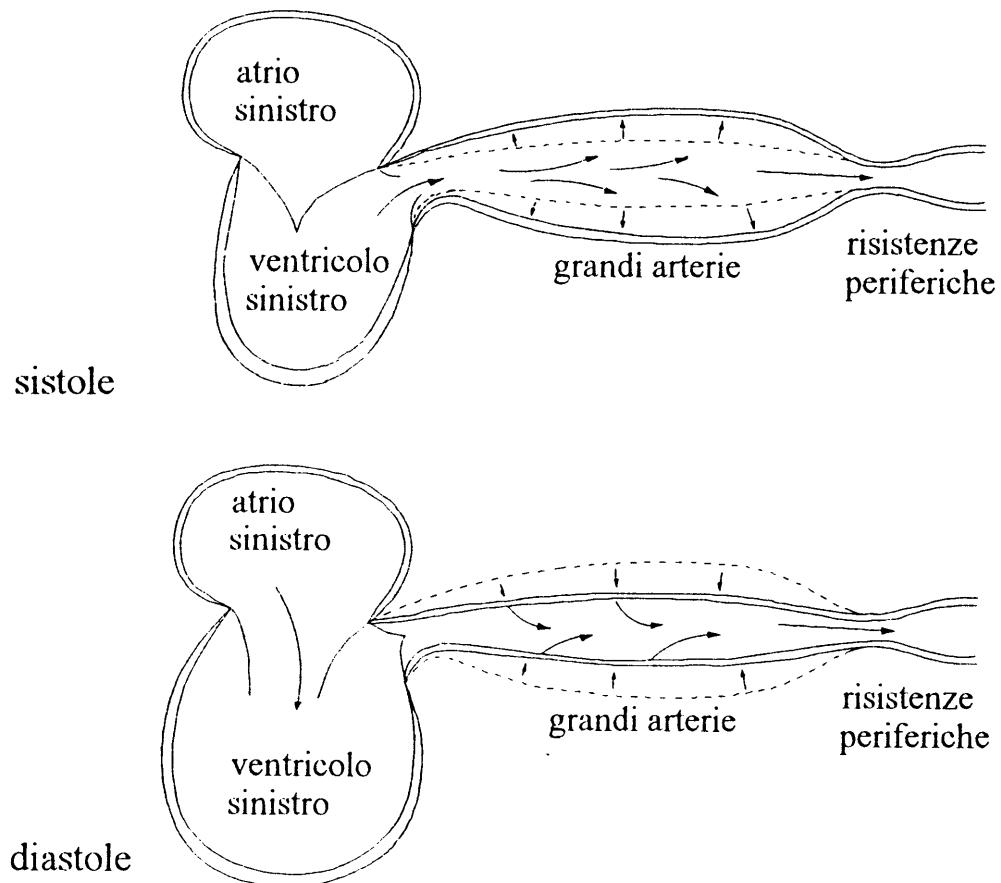


Figura 4.29 Comportamento elastico delle grandi arterie e loro ruolo nello smorzamento della pulsatilità del flusso di sangue in uscita dal ventricolo sinistro.

Vasi sanguigni (cont.)

- **Media:** (... cont.)
 - ★ **Piccole arterie** (lontane dal cuore):
 - soprattutto cellule muscolari lisce e una piccola parte di tessuto connettivo, collagene ed elastina
 - cellule muscolari sono avvolte ad elica con passo variabile ed organizzate in una struttura a strati
- **Adventizia:**
 - ★ può avere fino allo stesso spessore della media
 - ★ composta da fasci di fibre di collagene in direzione longitudinale (e anche fibre di elastina)

Vasi sanguigni

- Composizione di differenti tipi di vaso sanguigno

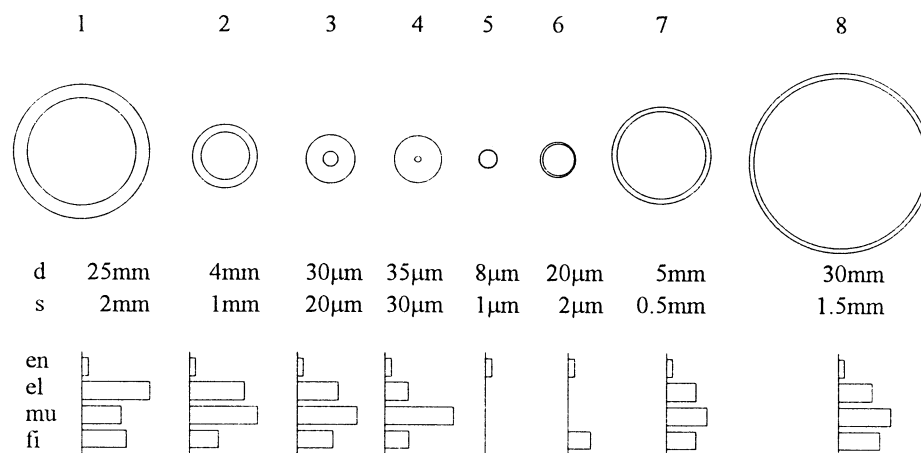


Figura 4.30 Dati relativi alle dimensioni (diametro d e spessore s della parete) e alla composizione di alcuni tipi di vaso sanguigno. Le dimensioni relative non sono disegnate in scala.

1: aorta; 2: arteria; 3: arteriola; 4: sfintere precapillare;
5: capillare; 6: venula; 7: vena; 8: vena cava;
en: endotelio; el: tessuto elastico; mu: tessuto muscolare;
fi: tessuto fibroso.

(da: AC Burton, *Physiol. Rev.*, 33, pp. 619, 1954).

- Arterie di grosso calibro (aorta, succlavia, etc.) hanno una tunica media prevalentemente elastica
- Arterie di medio e piccolo calibro (omeroale, radiale, femorale, etc.) hanno una tunica media prevalentemente muscolare
- Arteriole hanno una tunica media ad elevato contenuto muscolare, avendo il ruolo di regolare la distribuzione di sangue restringendosi e dilatandosi

Vasi sanguigni

- Contenuto percentuale di elastina nei diversi punti del sistema arterioso di un cane

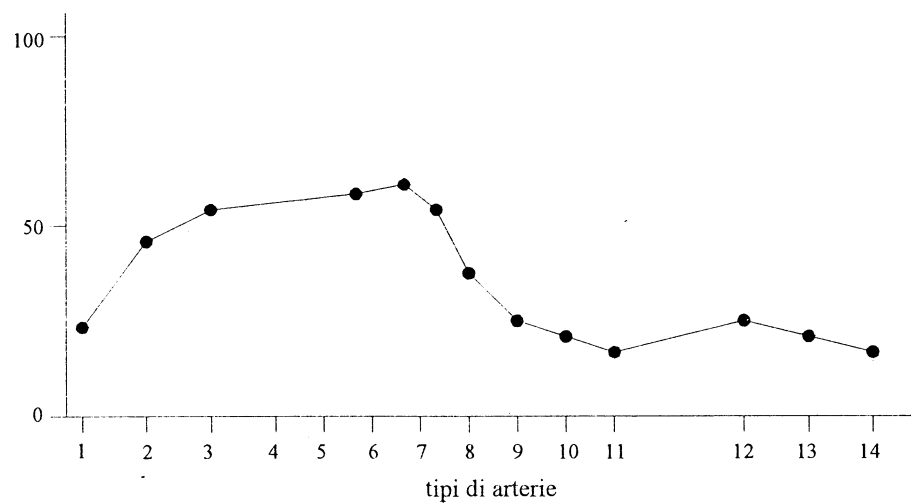


Figura 4.31 *Contenuto percentuale di elastina nel sistema arterioso del cane.*
1: carotide; 2: anonima e succlavia; 3: arco aortico; 4: aorta toracica 8 cm sopra il diaframma; 5: aorta toracica 6 cm sopra il diaframma; 6: aorta toracica 4 cm sopra il diaframma; 7: aorta toracica 2 cm sopra il diaframma; 8: aorta toracica all'altezza del diaframma; 9: aorta addominale 2 cm sotto il diaframma; 10: aorta addominale 4 cm sotto il diaframma; 11: aorta addominale 6 cm sotto il diaframma; 12: arteria iliaca; 13: arteria femorale; 14: arteria safena (da: AC Burton 'Physiology and Biophysics of Circulation' Year Book Medical Publ., Inc., Chicago, 1965).

- La quantità relativa di elastina diminuisce al diminuire del diametro del vaso

Vasi sanguigni: comportamento meccanico

- La risposta meccanica dei vasi sanguigni è fortemente anisotropa (dipende dalla direzione di applicazione del carico)

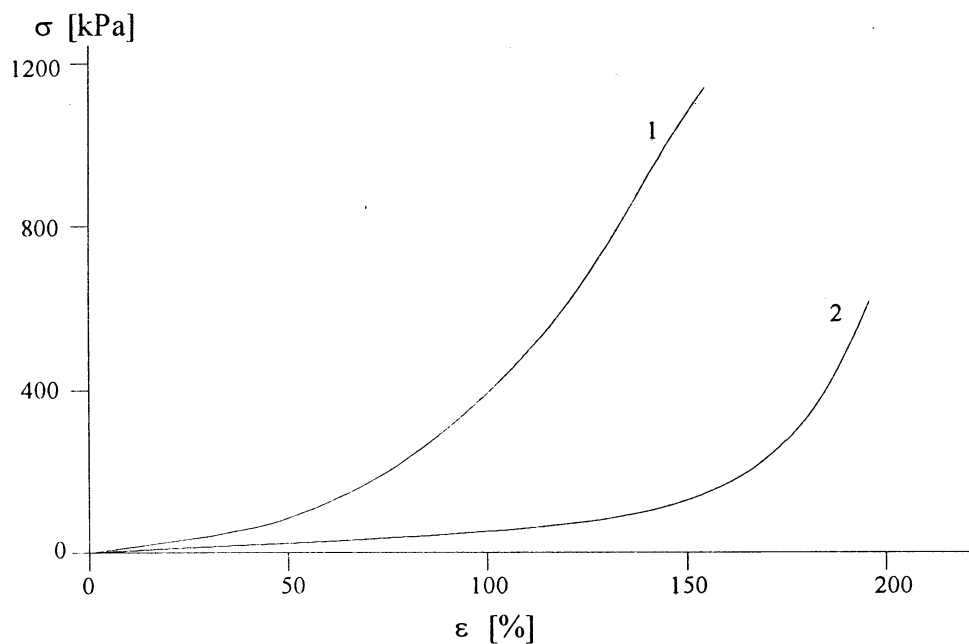


Figura 4.32 *Comportamento meccanico a trazione dell'aorta addominale di cane in direzione longitudinale (1) e in direzione radiale (2) (da: JB Park e RS Lakes 'Biomaterials: an Introduction. Second Edition', Plenum Press, New York, 1992).*

- Risultati relativi ad un'aorta di cane
- Comportamento più rigido in direzione longitudinale rispetto alla direzione radiale

Tessuto muscolare

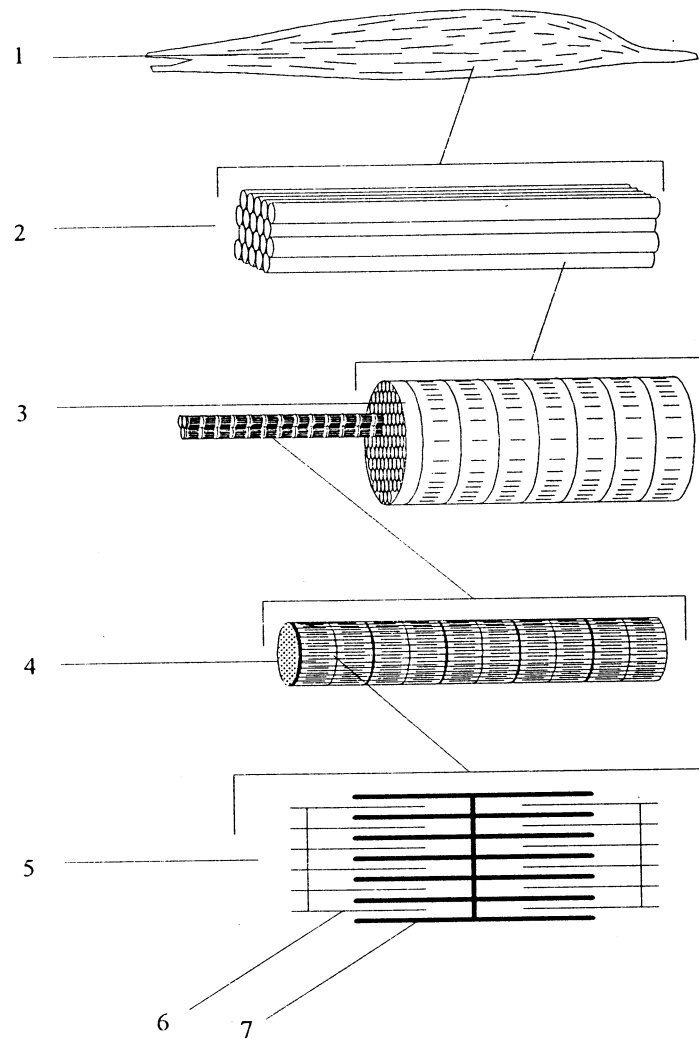


Figura 4.33 *Organizzazione strutturale del muscolo striato.*
1: *muscolo*
2: *fibre muscolari*
3: *fibra muscolare*
4: *miofibrilla*
5: *sarcomero (unità elementare contrattile)*
6: *filamento di actina*
7: *filamento di miosina*

Tessuto muscolare

- Tessuto particolare in quanto ha capacità contrattili, dovuta alla presenza di due filamenti:
 - miosina, o filamento spesso
 - actina, o filamento sottile
- Durante l'attivazione muscolare, si formano dei legami (ponti) tra i due filamenti che generano una forza che tende a far scorrere un filamento sopra l'altro causando l'accorciamento del muscolo
- La forza generata dipende dal numero di ponti che si generano tra i filamenti proteici, dall'allungamento del muscolo nell'istante che precede la contrazione, dall'accorciamento nell'istante considerato
- Il muscolo possiede anche capacità elastiche passive

Tessuto muscolare

- Modello rappresentativo del comportamento attivo e passivo del muscolo

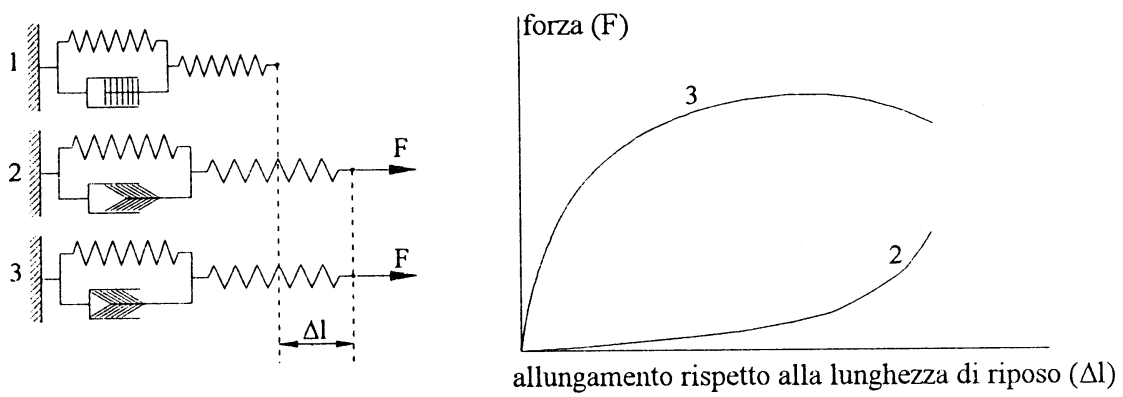


Figura 4.34 *Modello e caratteristiche meccaniche del muscolo. 1: il muscolo è a riposo, non genera forza nè reagisce a forze esterne; 2: il muscolo non attivato viene sottoposto ad una forza esterna che ne determina l'allungamento, la caratteristica meccanica passiva è di tipo esponenziale; 3: il muscolo precedentemente allungato viene attivato e si contrae generando una forza superiore a quella elastica passiva e funzione dell'allungamento precedente.*

Materiali per endoprotesi

Modelli costitutivi più complessi

Viscoelasticità etc etc. pg 197 seg. Fundamentals of bio-mechanics

Modelli tendini e legamenti