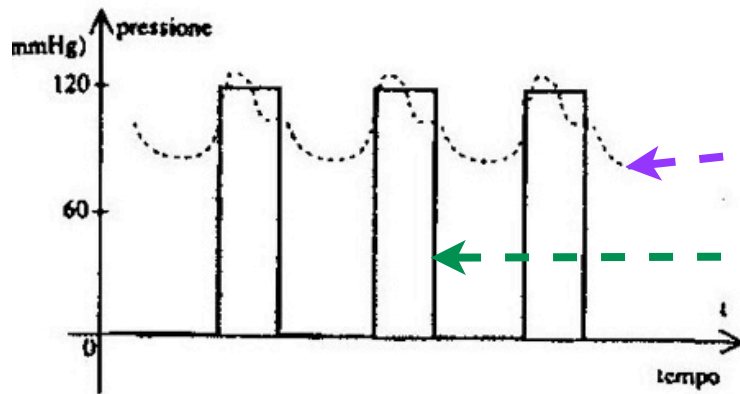
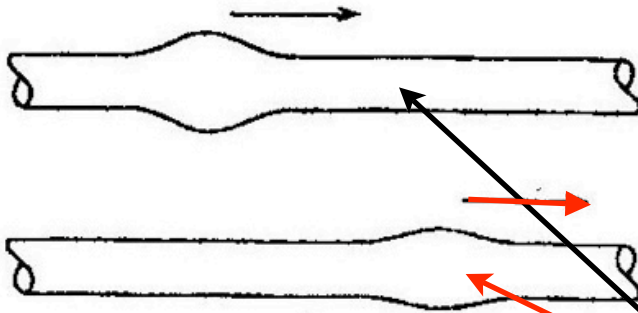




La curva tratteggiata rappresenta indicativamente la pressione nell'aorta durante alcuni cicli cardiaci, mentre quella continua schematizza l'andamento della pressione nel ventricolo. Se l'aorta fosse rigida la pressione arteriosa seguirebbe quella ventricolare.

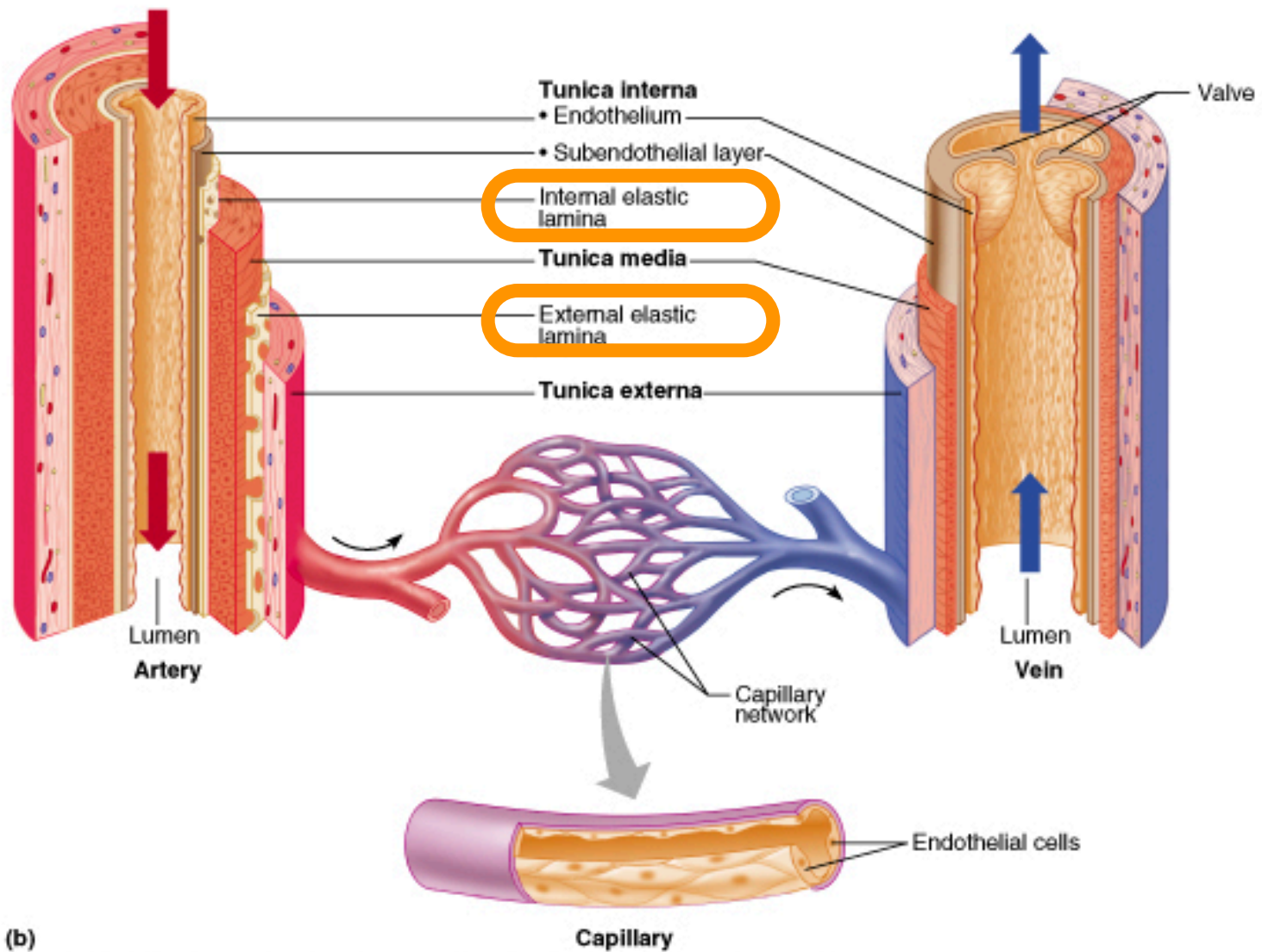
Si ha pertanto, grazie alla distensibilità delle arterie, la trasformazione di flusso pulsatile a flusso quasi stazionario.



La deformazione meccanica delle pareti si propaga con una velocità che dipende dalle caratteristiche geometriche e meccaniche della parete, dalle sue proprietà elastiche. La **velocità di propagazione della deformazione meccanica** della parete, aiuta il moto del sangue. In particolare la **velocità del sangue** è inversamente proporzionale alla velocità della deformazione meccanica (onda sfingica)

Concetti

- Elasticità di un corpo
- Legge di Hooke - modulo di Young

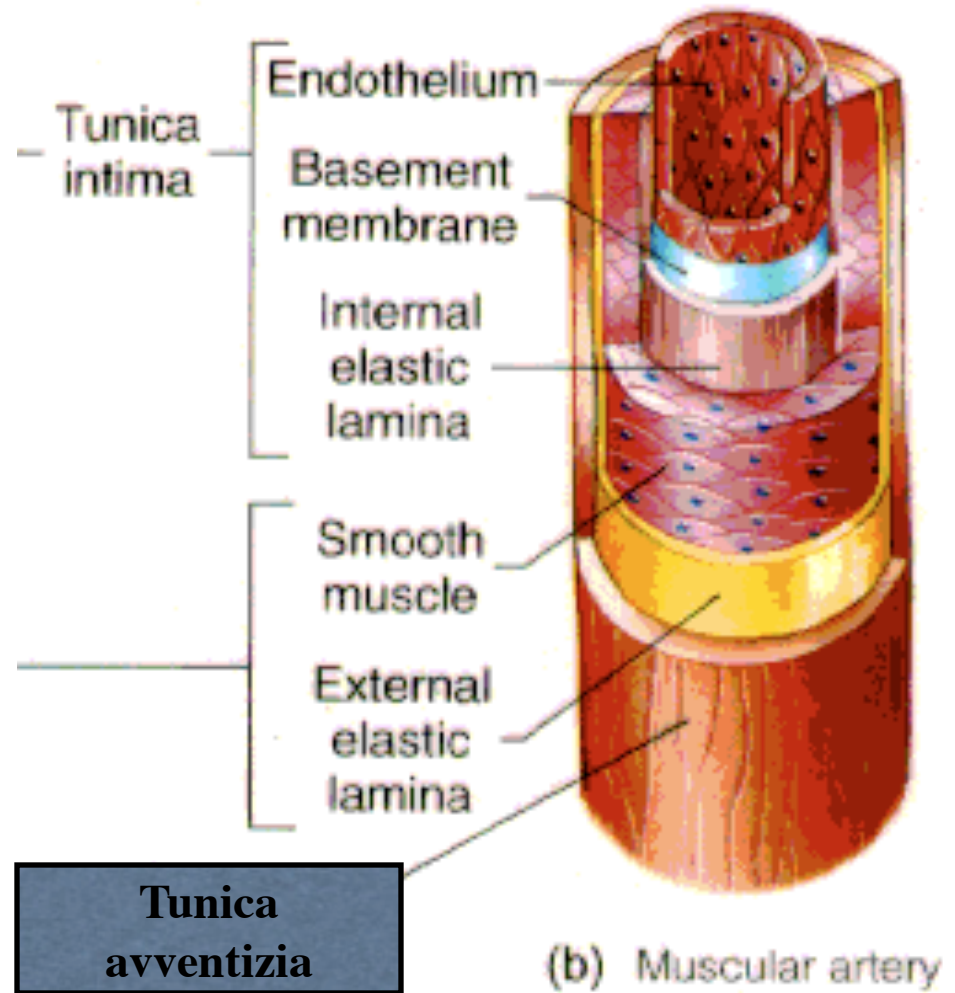


(b)

Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

Tunica Intima

- La tunica interna è la tunica intima
- Contiene l'endotelio, uno strato di cellule epiteliali del tipo "squamoso semplice". Questo strato riveste il lume di tutti vasi
- Le cellule epiteliali dei vasi sono dette cellule "endoteliali"
- Le cellule sono piatte, senza spazi inter-cellulari. Formano una superficie che minimizza l'attrito tra sangue e superficie del lume



Tunica Intima

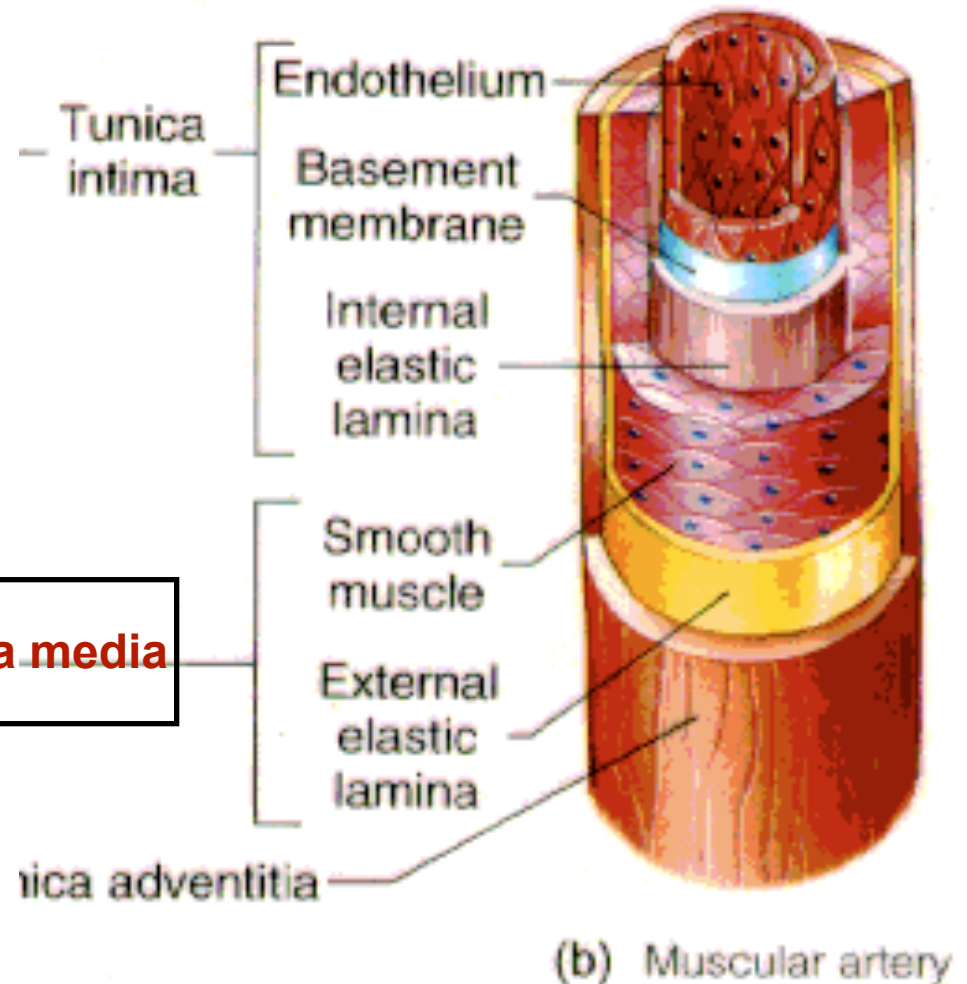
- Endotelio con lamina basale

Tessuto connettivo subendoteliale con

- collagene, fibre elastiche e alcune cellule del muscolo liscio e la lamina elastica interna (ma solo nei vasi di grosso calibro)
- Endotelio = tessuto epiteliale squamoso semplice
- Poco spazio intercellulare
- Trasporto transendoteliale

Tunica Media

- La tunica media è
• formato principalmente da cellule del muscolo liscio e **foglie di elastina**. Le cellule sono orientate a spirale.
- L'attività del muscolo
• liscio è regolata da fibre nervose vasomotorie che fanno parte sistema nervoso autonomo (simpatico).



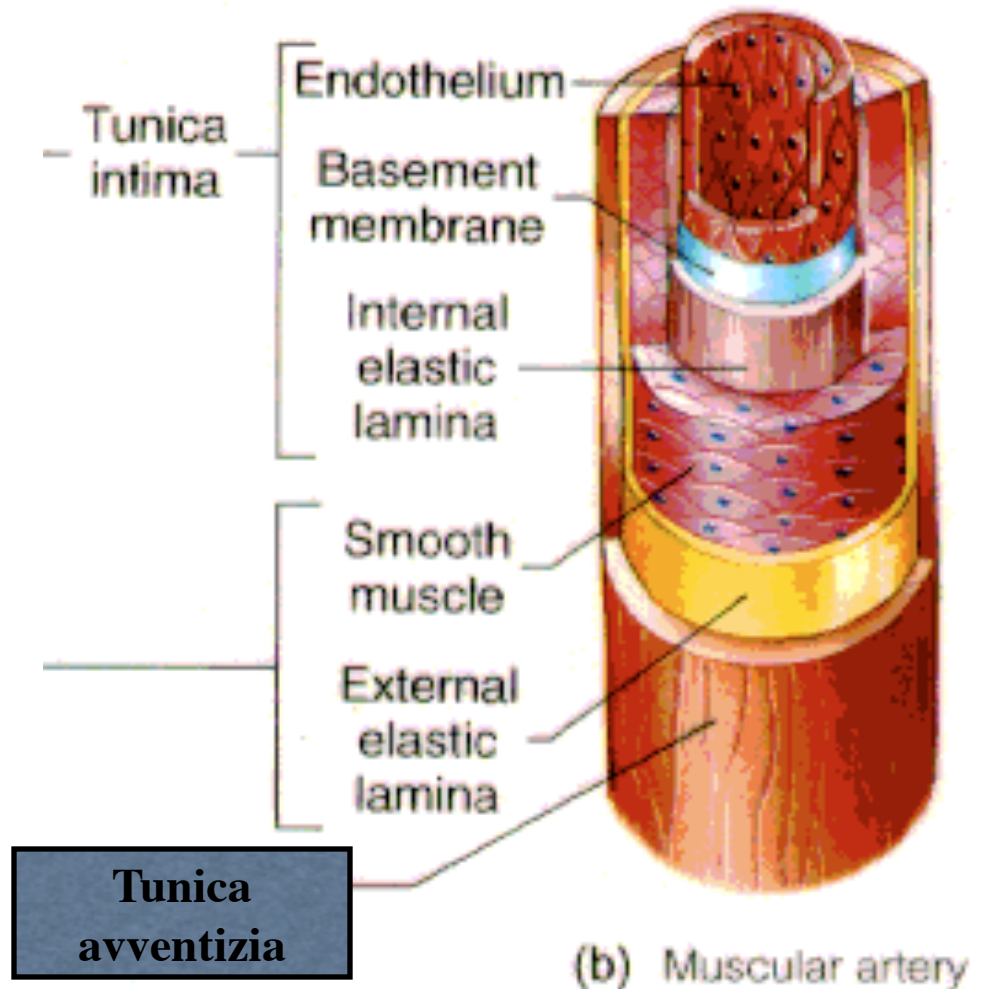
- Le fibre vaso motorie possono causare vaso costrizione o vaso dilatazione a secondo delle condizioni del corpo.
- Le attività della tunica media sono importanti nella regolazione della dinamica del sistema circolatorio.
- In genere, la tunica media è lo strato piu' spesso nelle arterie, ed è responsabile del mantenimento della pressione sanguigna e di un flusso continuo di sangue.

Tunica Media

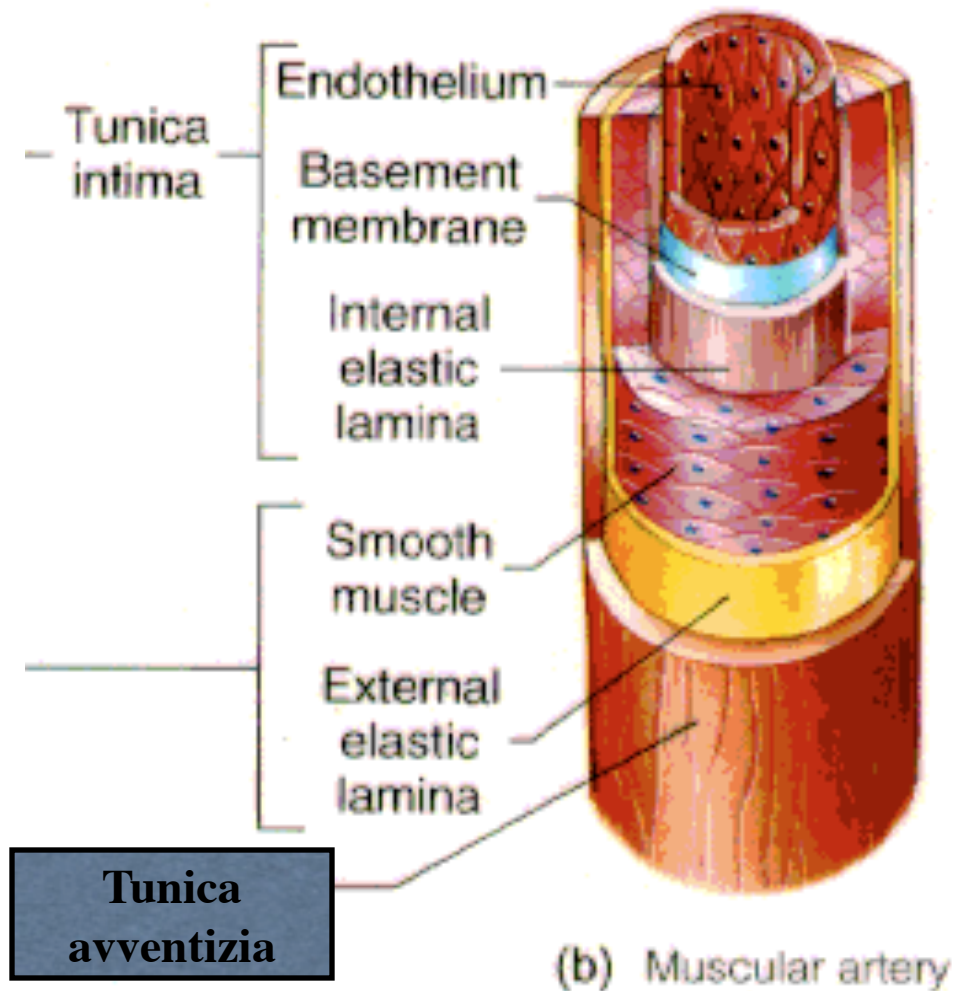
- Contiene: Cellule del muscolo liscio, collagene, e alcune fibre elastiche
- Le SMC sono orientate come un spirale
- Sono le SMC che producono il collagene e le fibre elastiche
- Ci sono pochi fibroblasti
- **C'è la lamina elastica esterna che contiene un'alta concentrazione di fibre elastiche**
- è lo strato più spesso nelle arterie

Tunica Avventizia

- Lo strato esterno è la tunica avventizia
- è composta principalmente da fibre di **collagene non compatte**. Questo strato protegge i vasi e ne permettono l'ancoraggio ad altre strutture. Esso forma una sorta di continuità tra vaso e gli altri tessuti del corpo.



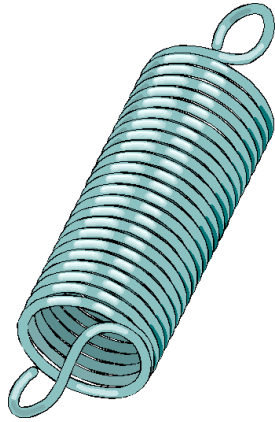
- La tunica avventizia è infiltrata con fibre nervose, vasi linfatici e in vasi di grosso calibro, con un sistema di vasi piccoli.
- Questi vasi, i “*vasa vasorum*” portano O_2 e sostanze nutrienti ai tessuti esterni della parete del vaso



Tunica Avventizia

- Tessuto connettivo e fibroblasti: **tanto collagene**
- Più sottile della tunica media
- Poche fibre elastiche
- è piu' rigido della tunica media, e protegge il vaso da sovradeformazione
- Contiene i vasa vasorum e i nervi vascolari

ELASTICITA'



In natura non esistono corpi assolutamente rigidi: **tutti i corpi sottoposti all'azione di forze esterne subiscono, in qualche misura, delle deformazioni.**

Si definisce **elastico** un corpo che, cessata l'azione della forza che lo ha deformato, riprende la propria forma originaria.

Se la deformazione invece rimane dopo che è stata rimossa la causa che l'ha provocata, si definisce plastica, e **plastico** il corpo che l'ha subita.

Nel caso delle deformazioni elastiche l'entità della **deformazione** Δx è proporzionale all'intensità della forza che le ha causate:

$$F \propto \Delta x$$

o, in forma equivalente,

$$\vec{F} = -k \vec{\Delta x} \quad (\text{legge di Hooke})$$

Un corpo elastico, soggetto ad una forza esterna che ne provoca una deformazione, si oppone alla deformazione in virtù di una forza elastica di intensità proporzionale alla deformazione stessa e diretta in verso opposto

Dal punto di vista microscopico, la reazione di un corpo elastico alle deformazioni corrisponde alla perturbazione della distanza di equilibrio tra le particelle che lo costituiscono.

Tutti i corpi possono essere considerati elastici purchè la deformazione sia abbastanza piccola.

Oltre un certo limite (**limite elastico**) la deformazione diventa irreversibile, perché la struttura microscopica del corpo risulta alterata irreversibilmente.

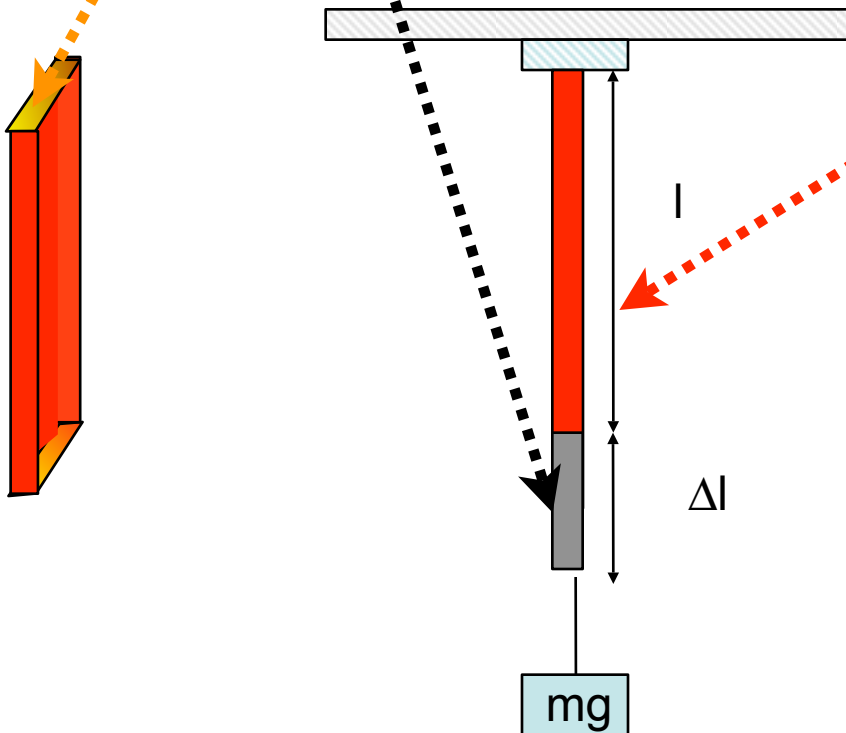
Se la forza applicata, e la deformazione indotta, sono ancora superiori, si arriva alla **rottura del corpo**.

Modulo di Young.

Se consideriamo un corpo elastico a forma di parallelepipedo, su cui agiscono forze costanti, omogeneamente distribuite e perpendicolari a due facce opposte di **superficie** **S**, si osserva che:

l'**allungamento** **Δl** subito è proporzionale alla **lunghezza** **l** del corpo;

l'intensità della forza necessaria per ottenere un certo allungamento Δl è proporzionale alla superficie su cui la forza agisce.



In queste condizioni la **legge di Hooke** può essere espressa nella forma:

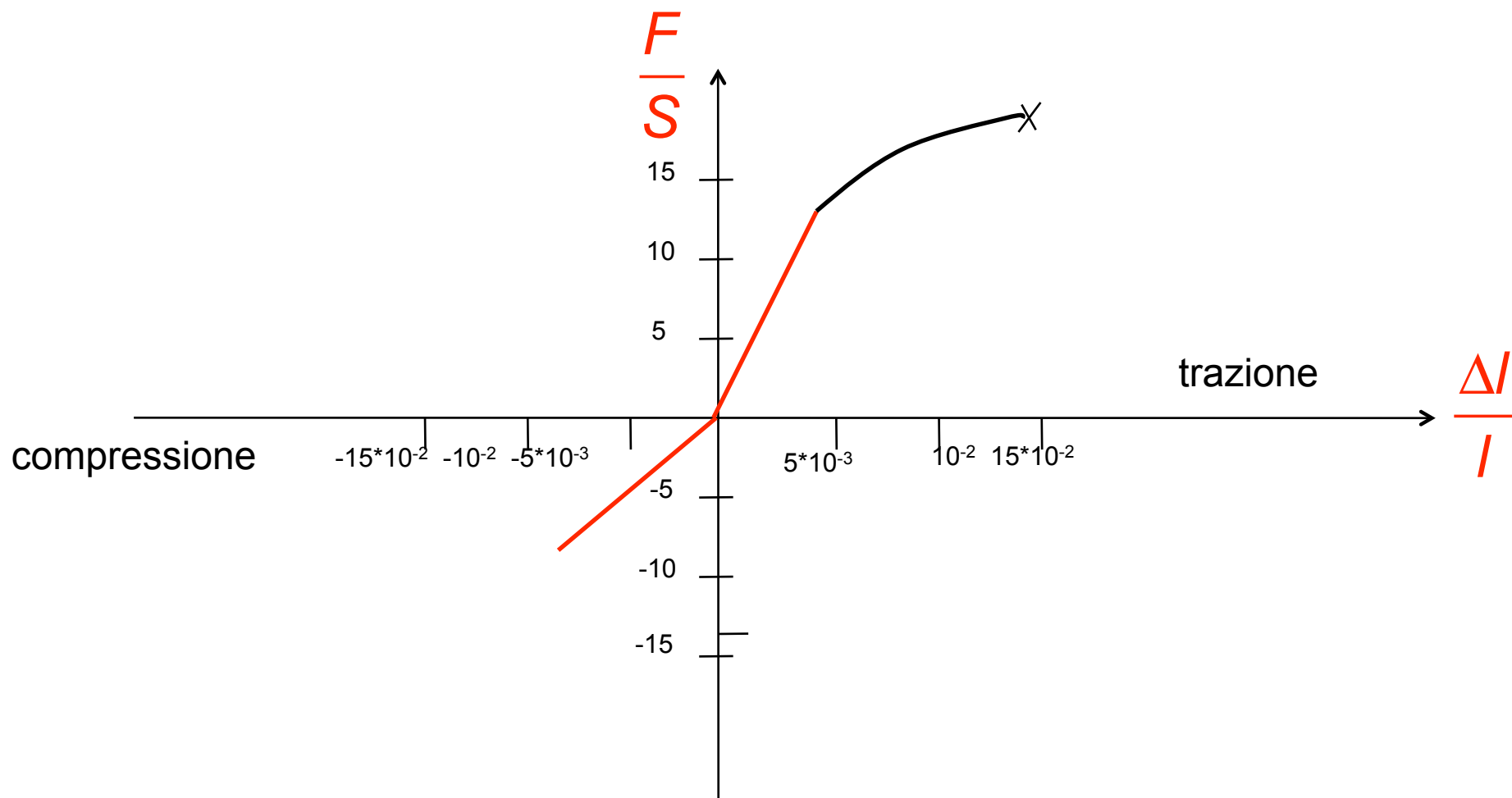
$$\frac{\vec{F}}{S} = Y \frac{\vec{\Delta l}}{l}$$

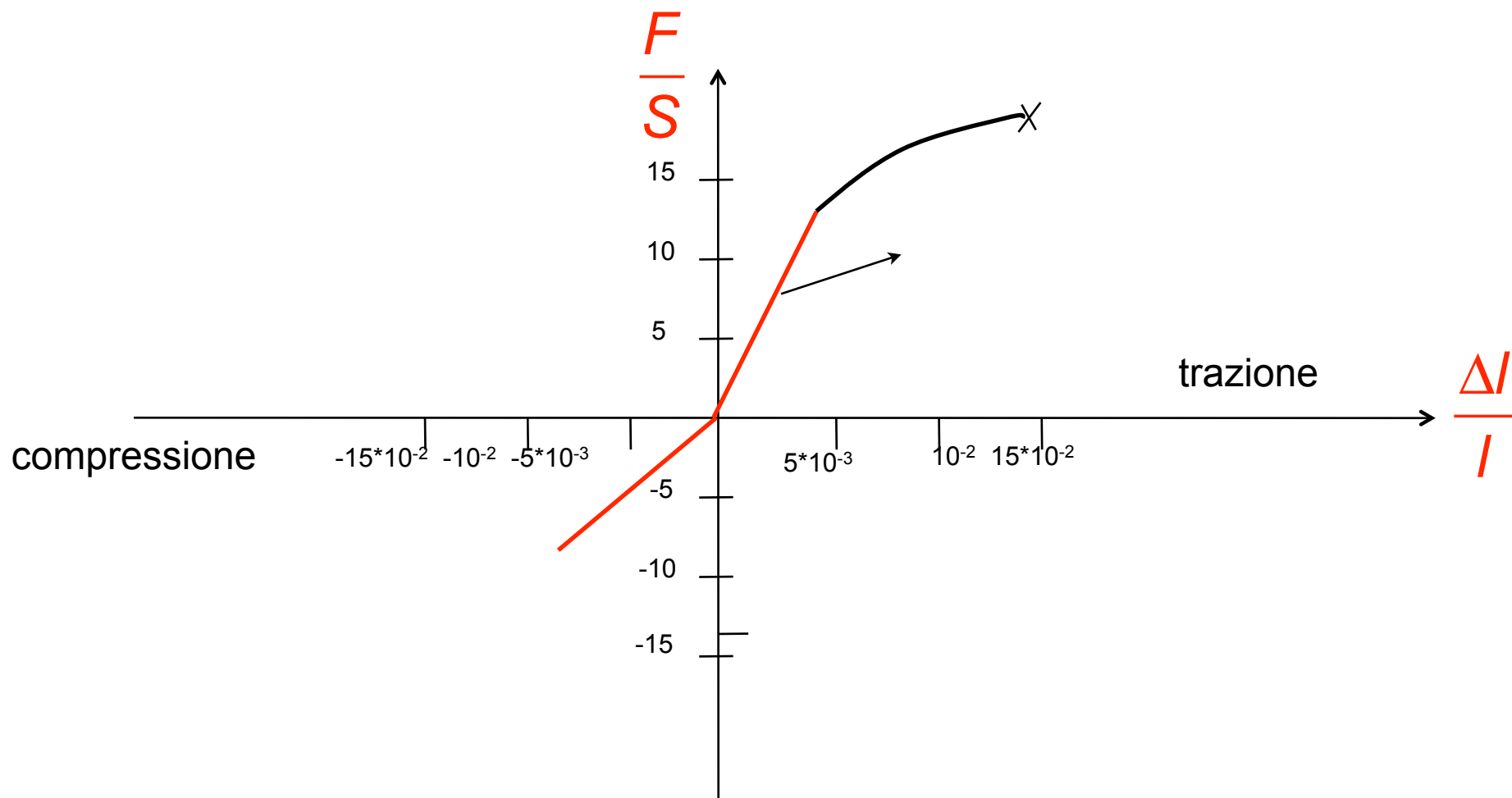
$$\vec{F} = YS \frac{\vec{\Delta l}}{l} = k \vec{\Delta l}$$

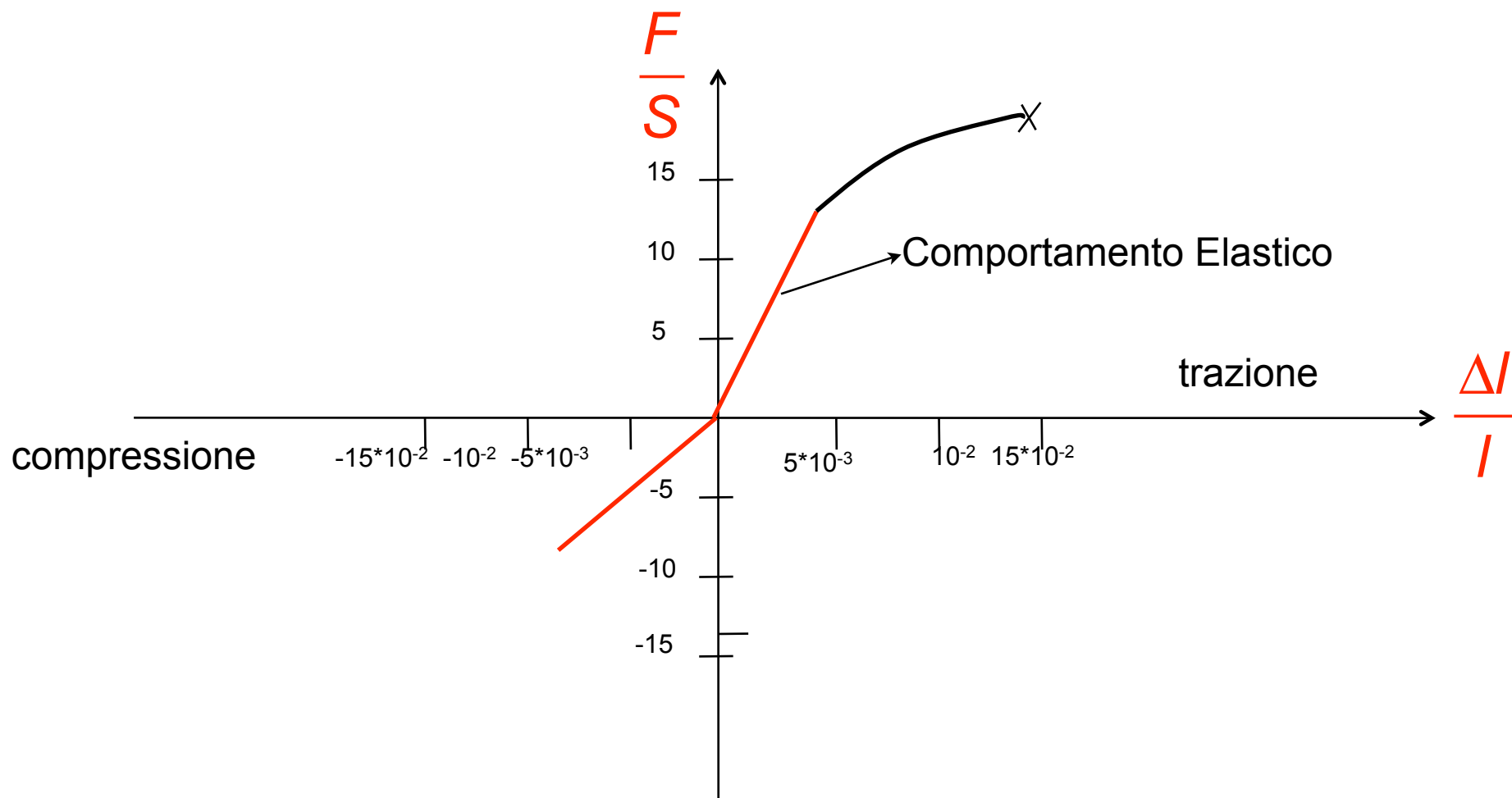
Il rapporto $\frac{F}{S}$ tra la forza applicata e la superficie su cui questa agisce prende il nome di **sforzo unitario (stress)**.

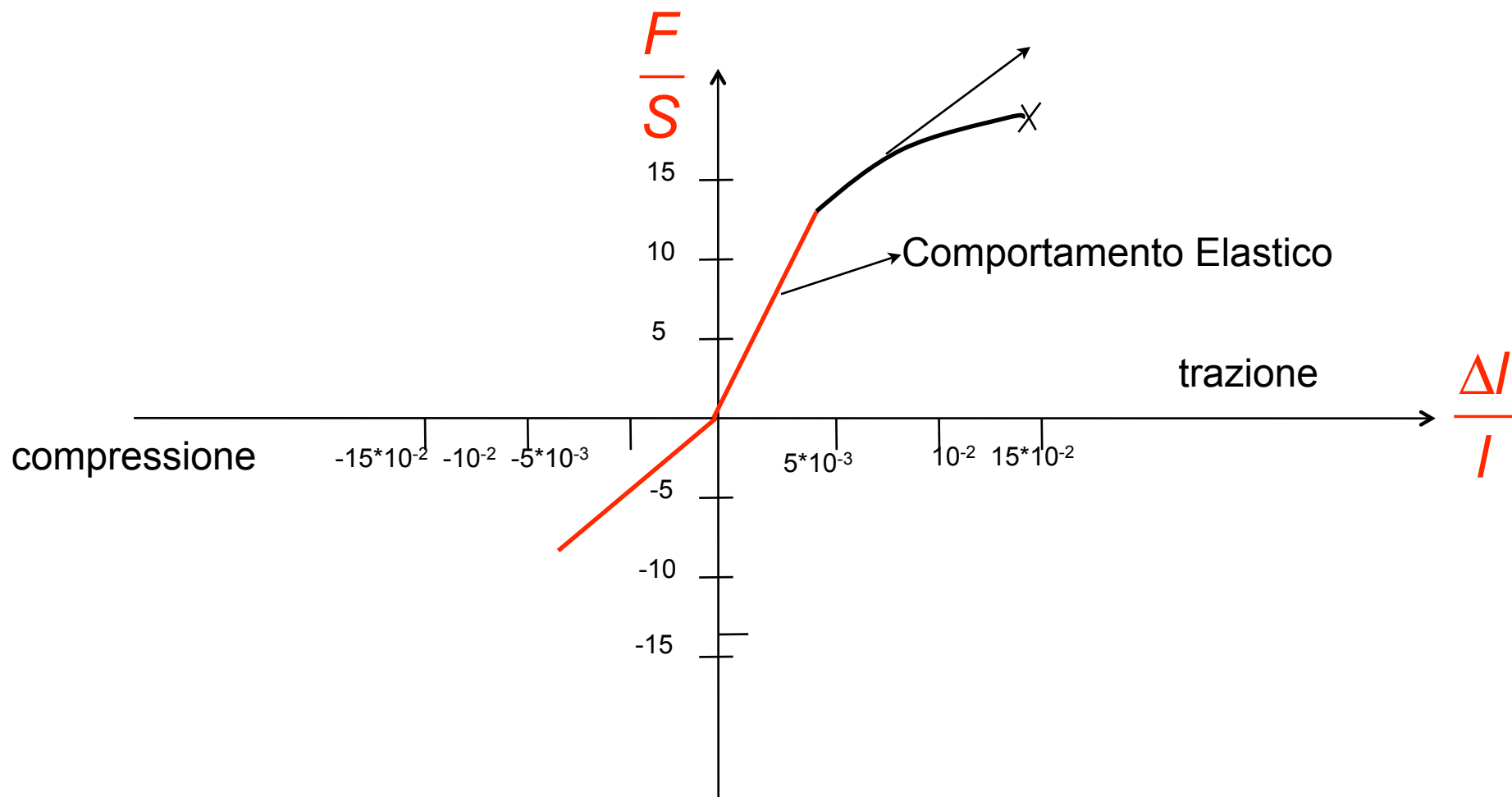
Il rapporto $\frac{\Delta l}{l}$ tra la deformazione del corpo e la sua lunghezza prende il nome di **deformazione relativa (strain)**.

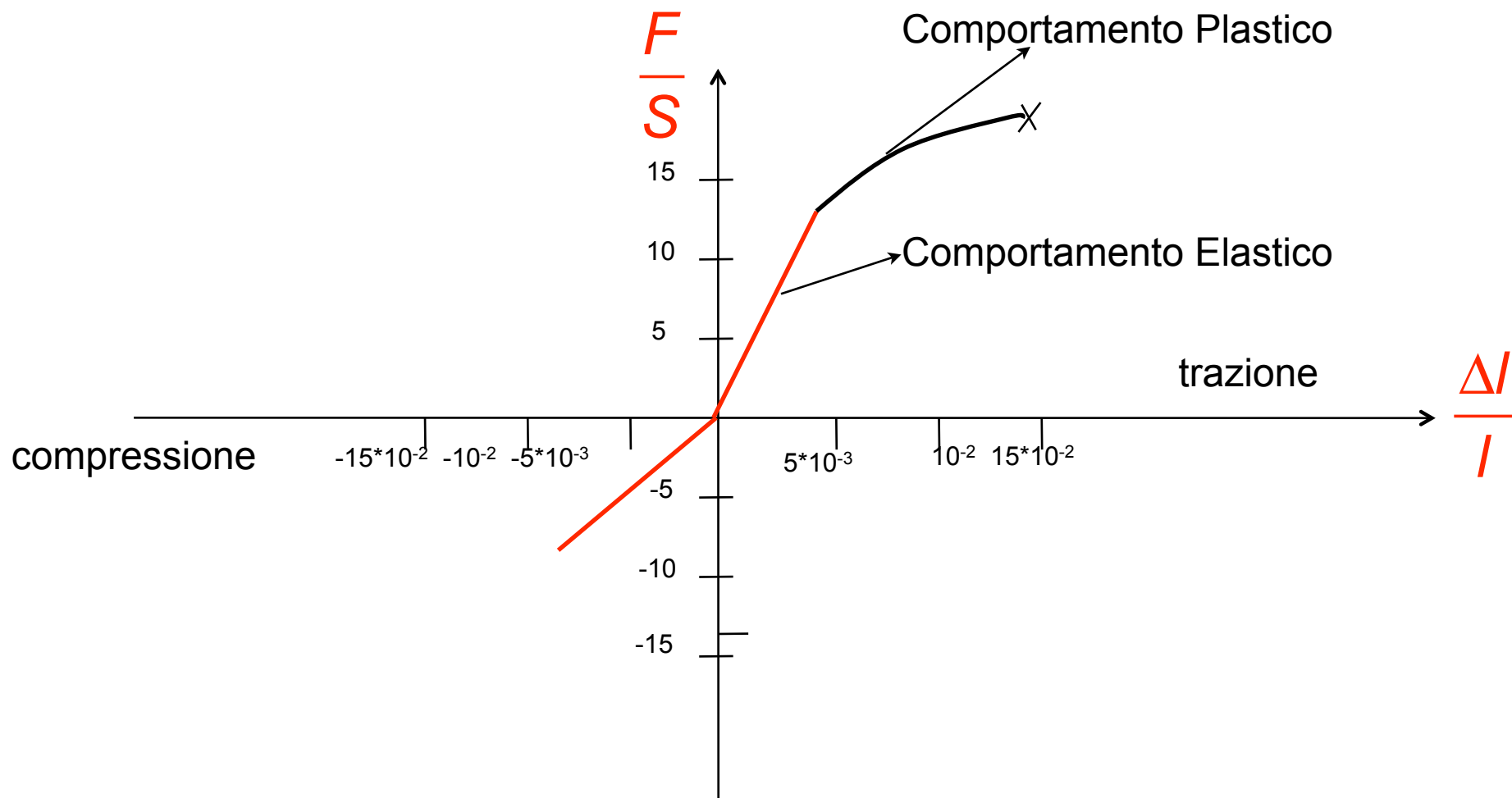
La costante di proporzionalità **Y** è indipendente dalle dimensioni geometriche del solido, e dipende solo dalla sua natura. Prende il nome di **modulo di Young**. In un grafico dello sforzo unitario in funzione della deformazione relativa, si ottiene una retta la cui pendenza è data dal modulo di Young.

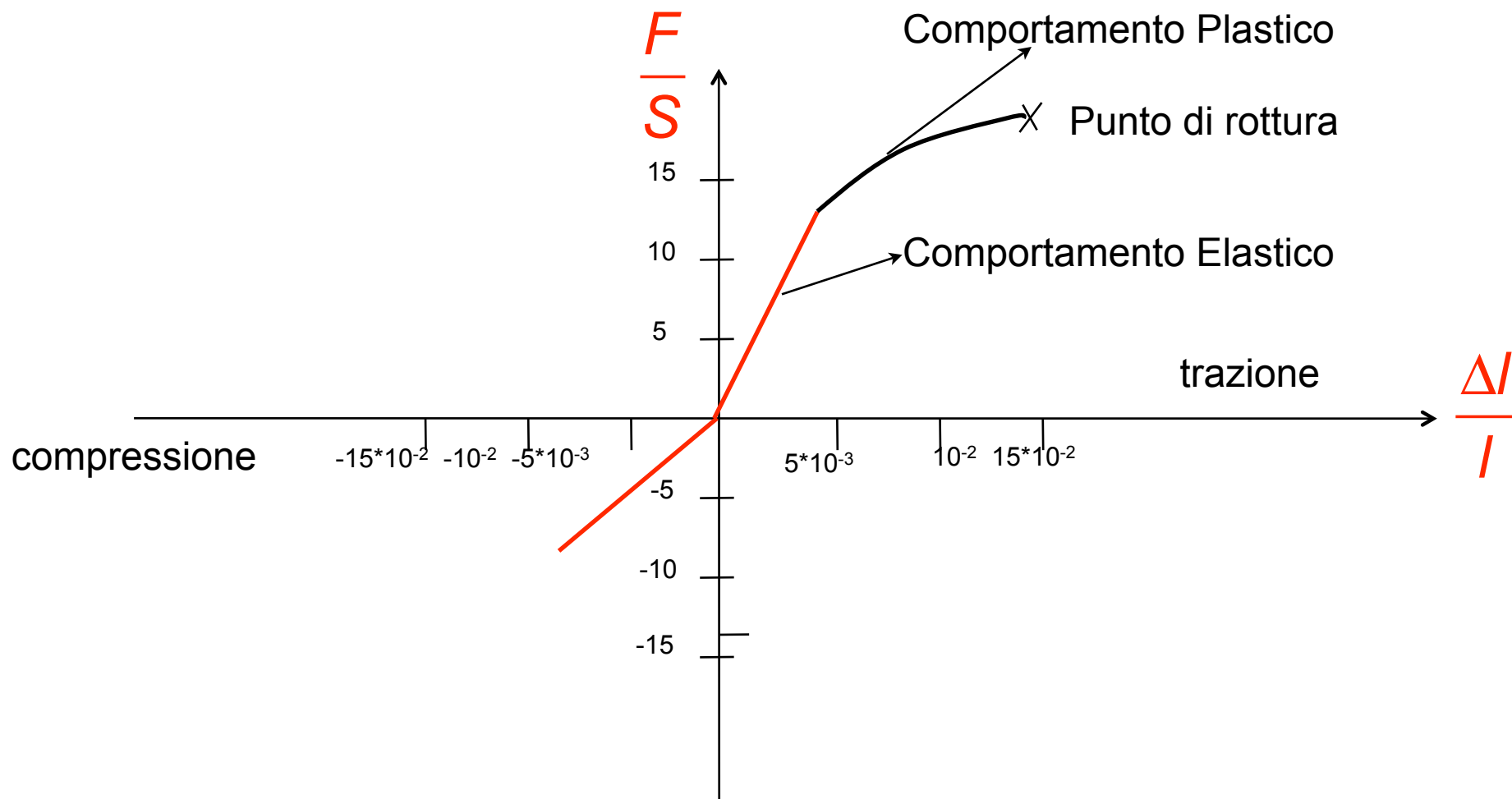


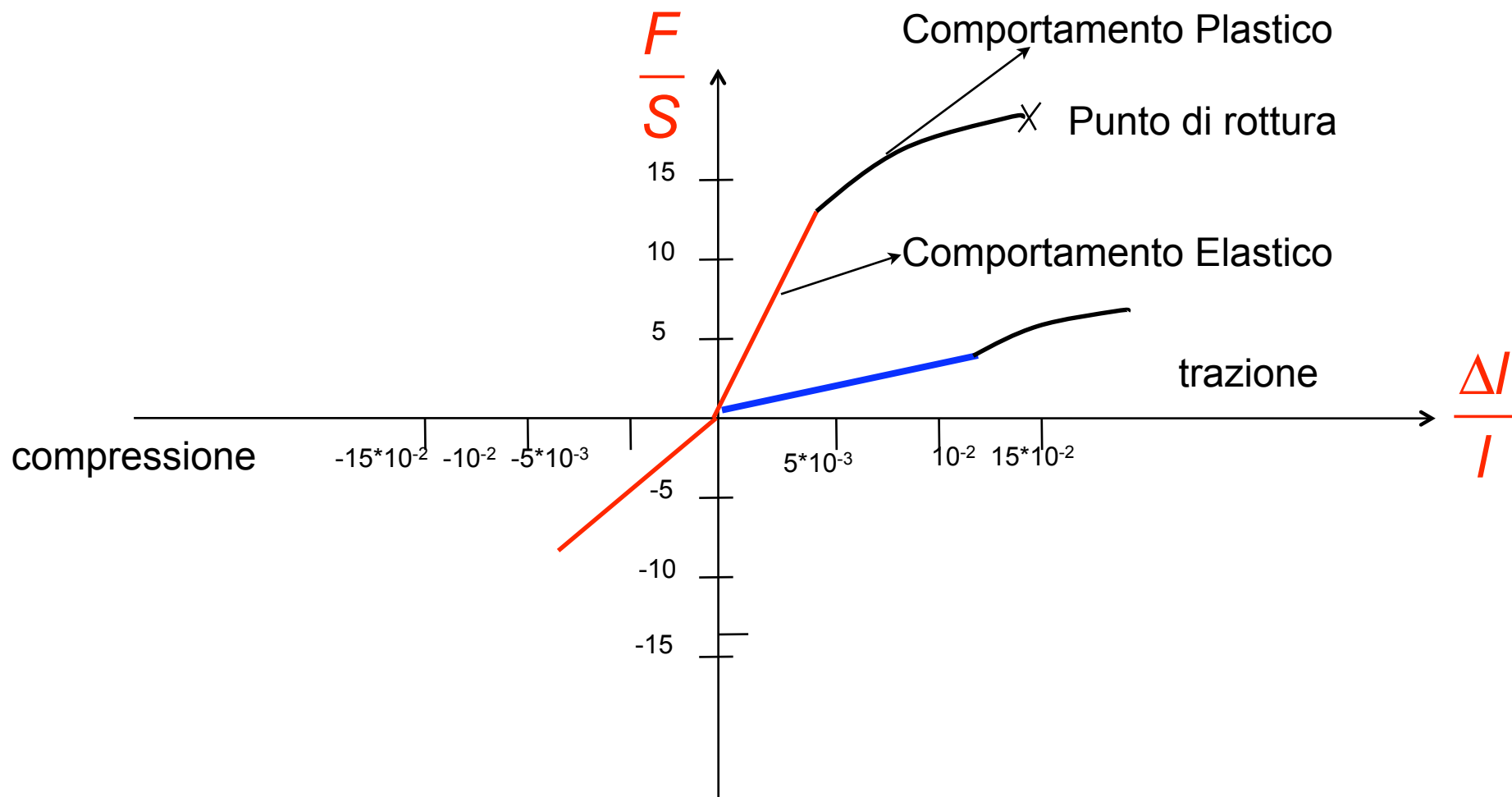


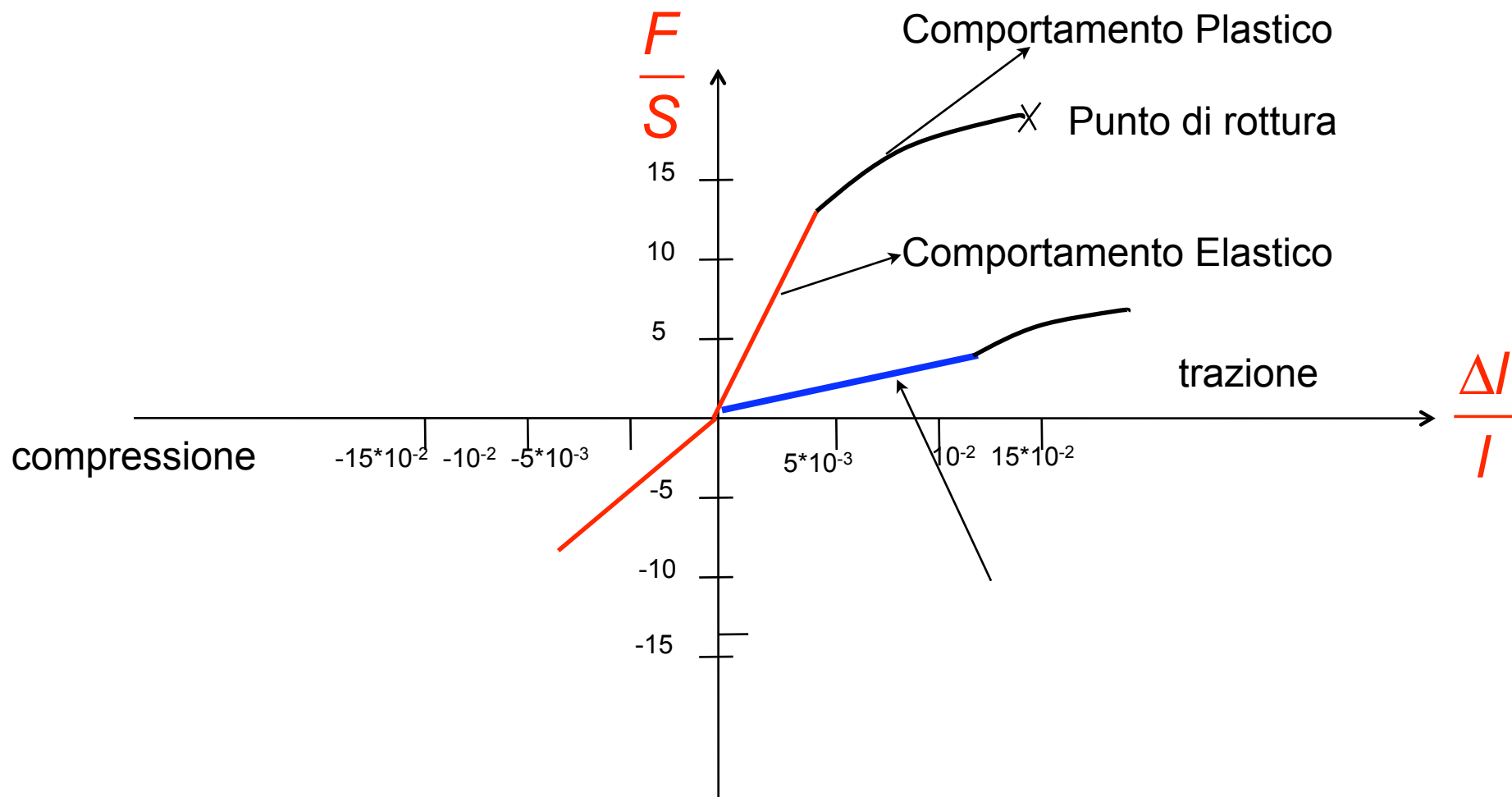


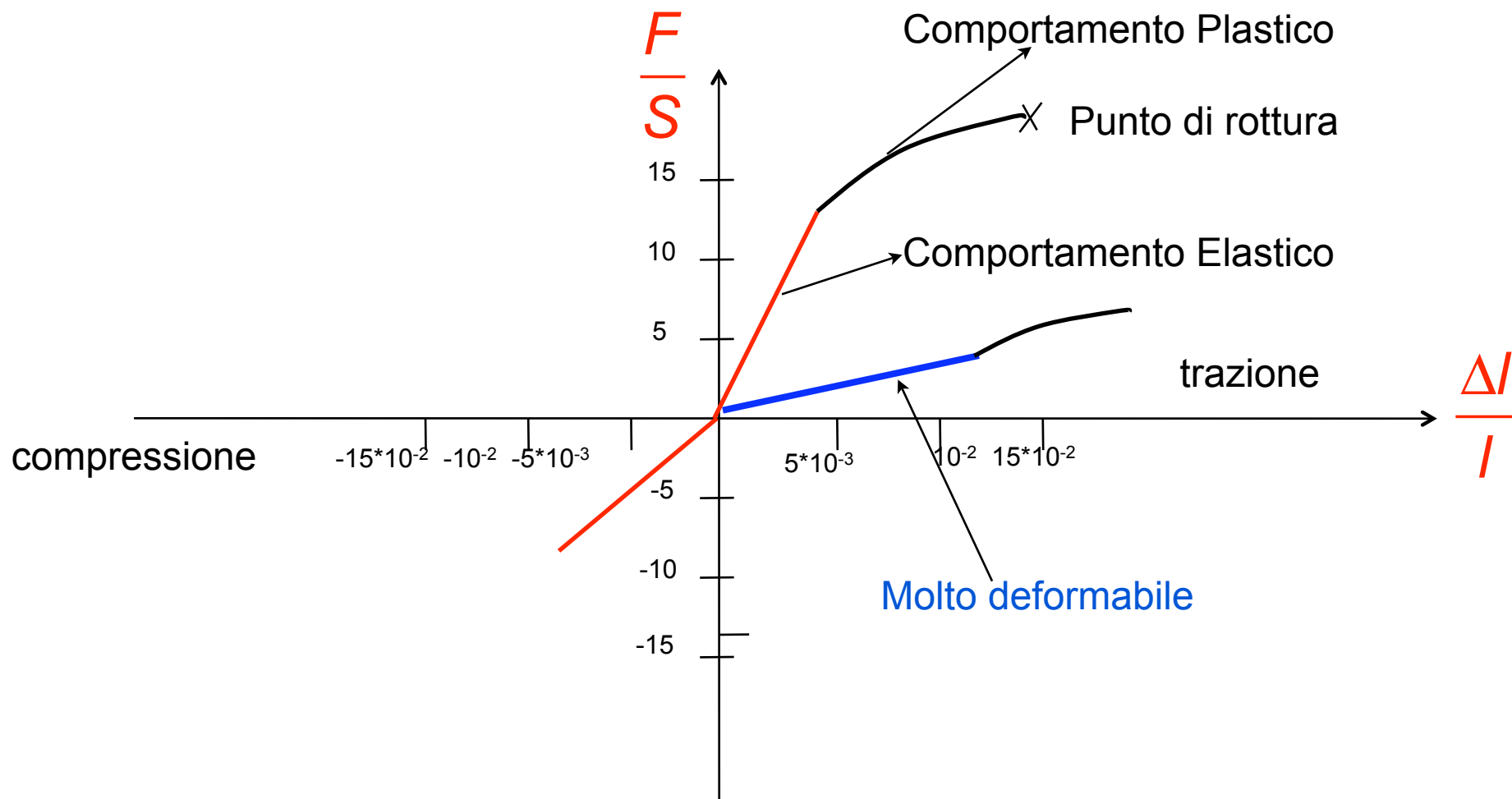


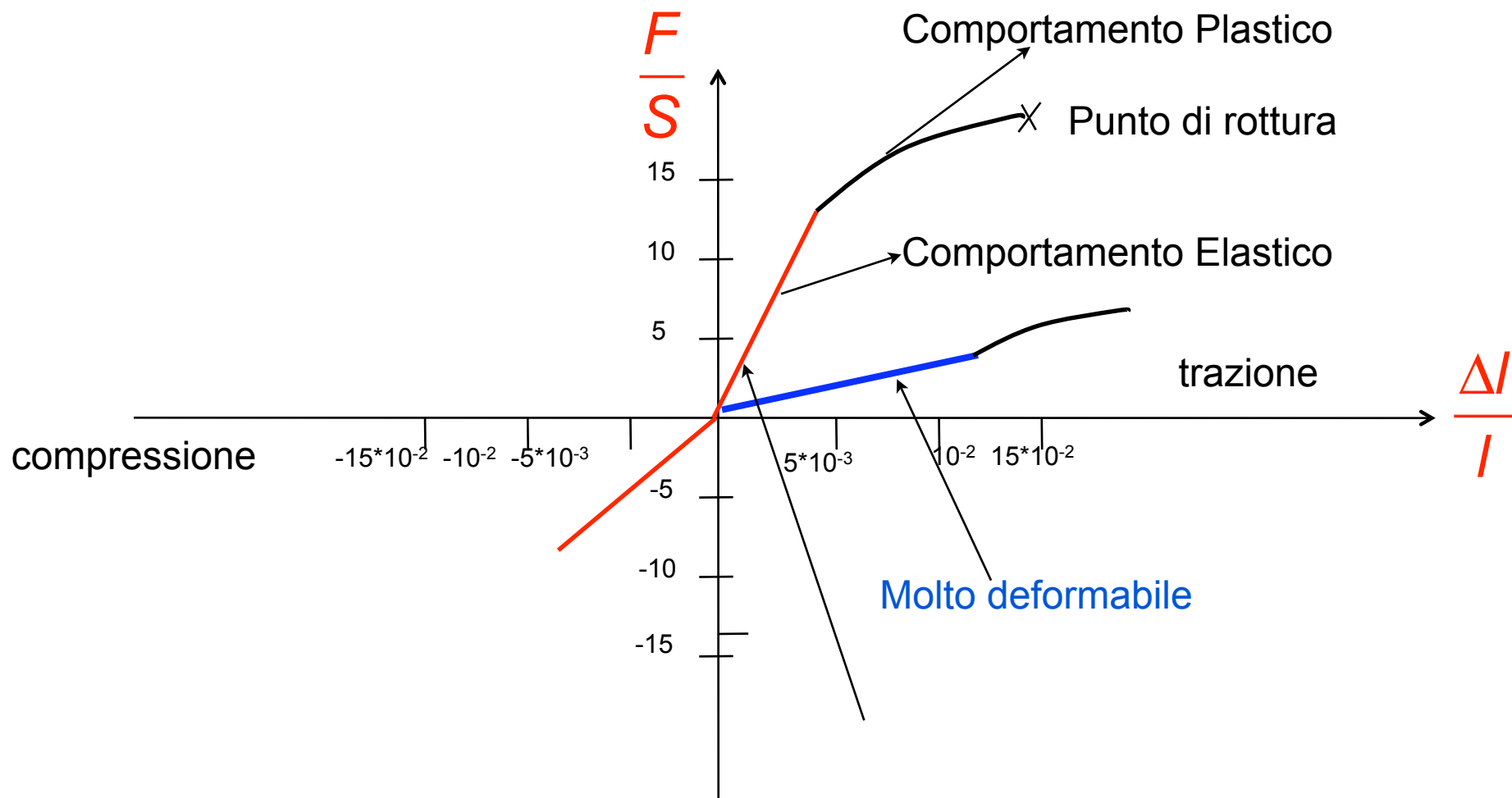


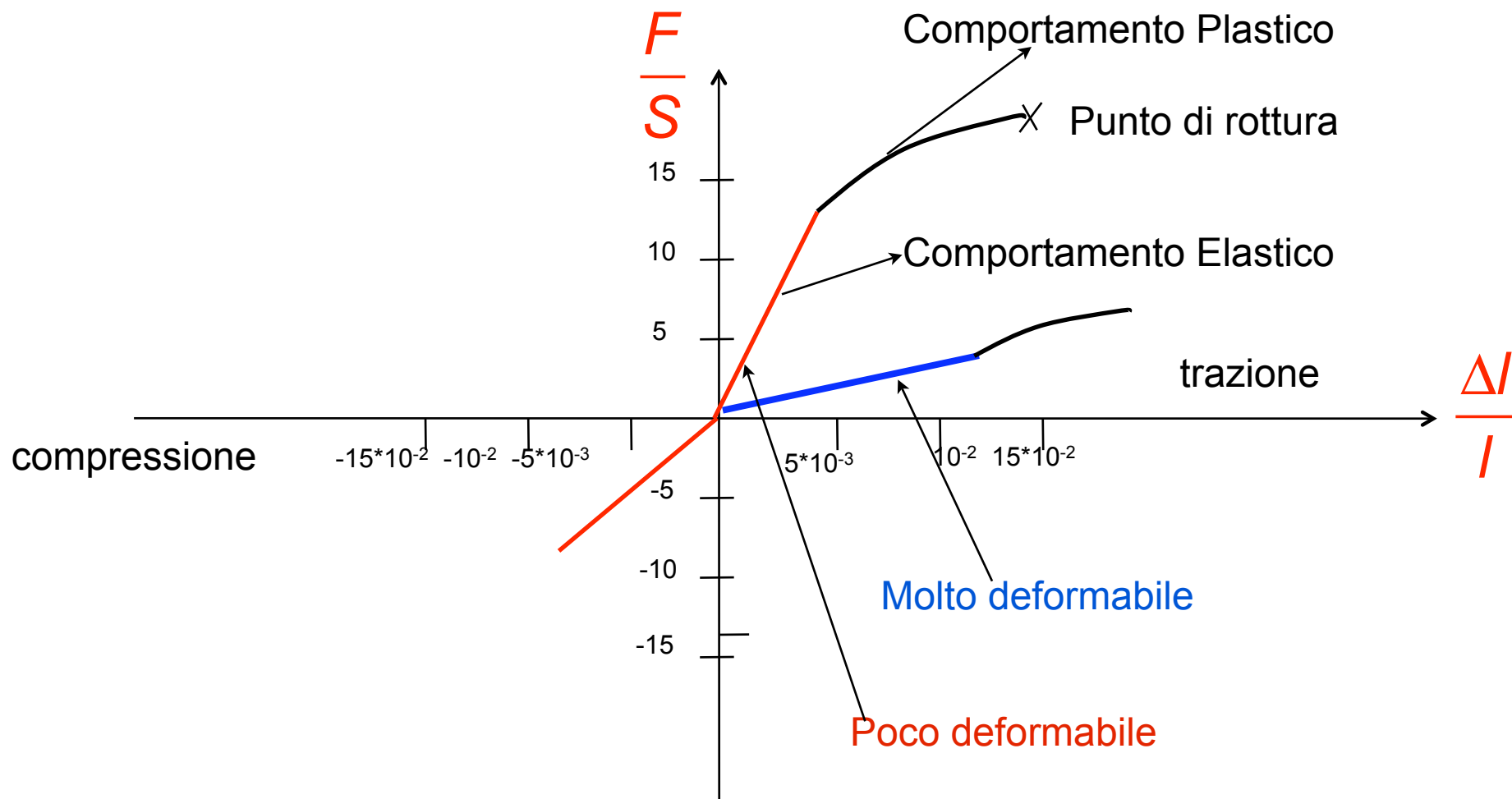












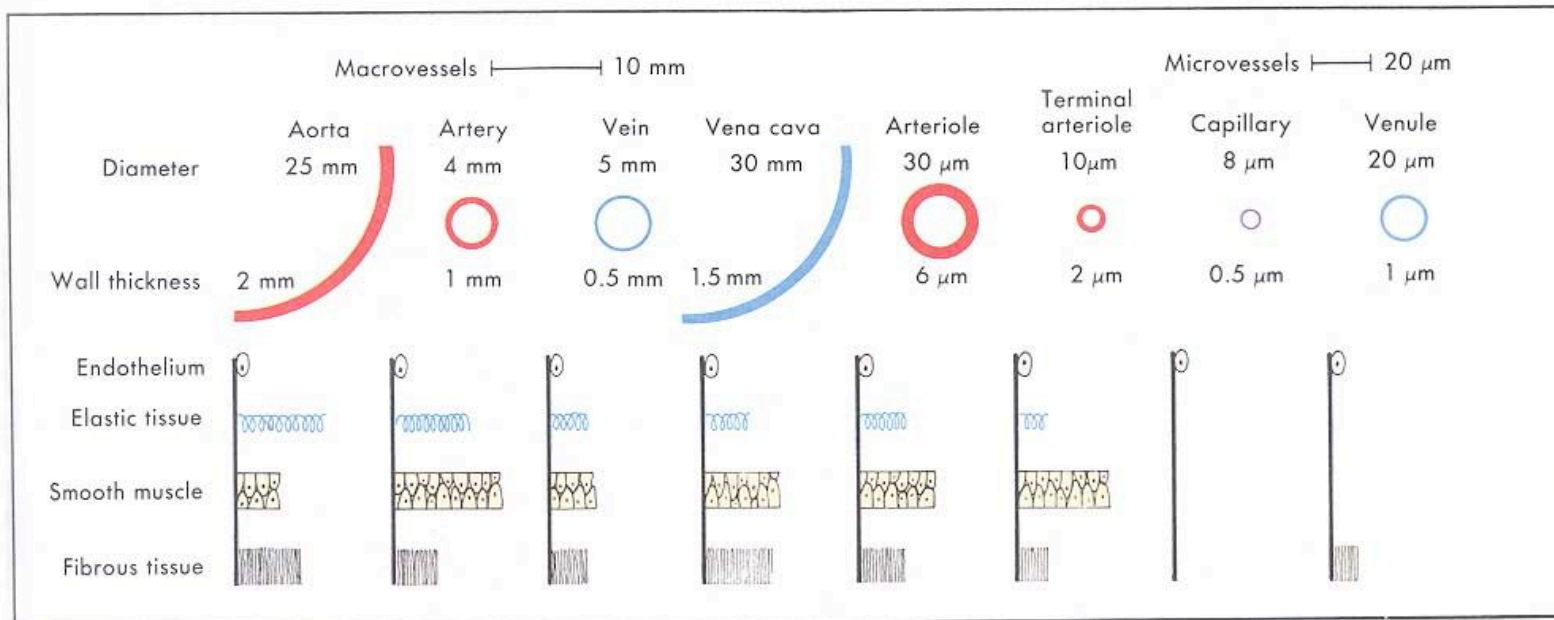
materiale	Y(N/m ²)	materiale	Y(N/m)
Acciaio	$2 \cdot 10^{11}$	Legno duro	$1 \cdot 10^{10}$
vetro	$7 \cdot 10^{10}$	tendine	$2 \cdot 10^7$
mattone	$2 \cdot 10^{10}$	Cartilagine (costole)	$1.2 \cdot 10^7$
Ossa(lungo L'asse-trazione)	$1.8 \cdot 10^{10}$	Gomma	$1 \cdot 10^6$
Ossa (lungo l'asse compressione)	$0.9 \cdot 10^{10}$	Vasi sanguigni	$2 \cdot 10^5$

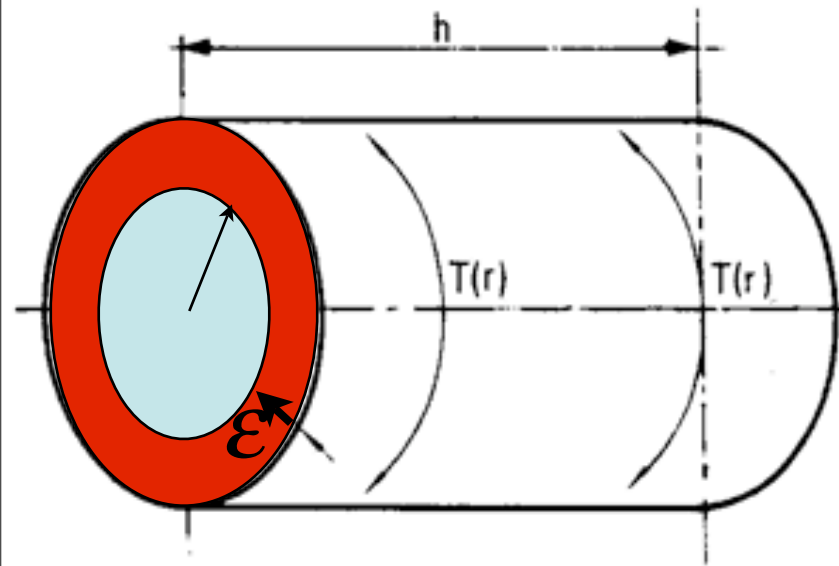
- Se il modulo di Young è elevato, occorrono sforzi elevati per ottenere deformazioni piccole: **più è alto il modulo di Young, meno un corpo è deformabile elasticamente.**

materiale	Y(N/m ²)	materiale	Y(N/m)
Acciaio	$2 \cdot 10^{11}$	Legno duro	$1 \cdot 10^{10}$
vetro	$7 \cdot 10^{10}$	tendine	$2 \cdot 10^7$
mattone	$2 \cdot 10^{10}$	Cartilagine (costole)	$1.2 \cdot 10^7$
Ossa(lungo L'asse-trazione)	$1.8 \cdot 10^{10}$	Gomma	$1 \cdot 10^6$
Ossa (lungo l'asse compressione)	$0.9 \cdot 10^{10}$	Vasi sanguigni	$2 \cdot 10^5$

Elasticità dei vasi sanguigni.

- Due tipi di fibre elastiche contribuiscono all'elasticità dei vasi sanguigni: **elastina e collagene**, entrambe disposte trasversalmente alla lunghezza dei vasi.
- Non tutti i vasi sanguigni sono uguali per quanto riguarda le caratteristiche elastiche: **l'aorta e le grandi arterie sono ricche di fibre elastiche disposte in più strati, le piccole arterie, le arteriole e le grandi vene presentano un certo grado di elasticità mentre capillari e venule sono privi di tessuto elastico.**
- L'elasticità dei vasi sanguigni consente al flusso del sangue di essere pulsatile e non intermittente.
- **Nel cuore la pressione del sangue varia da quasi 0 a circa 120 mm Hg.** In seguito alla sistole, il sangue raggiunge l'aorta che si dilata, immagazzinando energia potenziale elastica che restituisce durante la diastole sotto forma di energia cinetica.
- Questo meccanismo permette di limitare le escursioni della pressione, che sono quasi nulle a livello dei piccoli vasi.





In condizioni di riposo la lunghezza di una fibra circolare di raggio r_0 è $2\pi r_0$

Se per effetto di un aumento di pressione il vaso si dilata, il raggio della fibra passa dal valore r_0 al valore r e l'allungamento subito risulta essere :

$$\Delta l = 2\pi r - 2\pi r_0 = 2\pi(r - r_0)$$

$$\frac{F}{S} = Y \frac{\Delta l}{l} \rightarrow \frac{F}{h\varepsilon} = Y \frac{2\pi(r - r_0)}{2\pi r_0} \rightarrow T(r) = \varepsilon \frac{r - r_0}{r_0}$$

Il rapporto $\frac{F}{h}$ tra forza F e la lunghezza del vaso h prende il nome di **tensione del vaso** $T(r)$

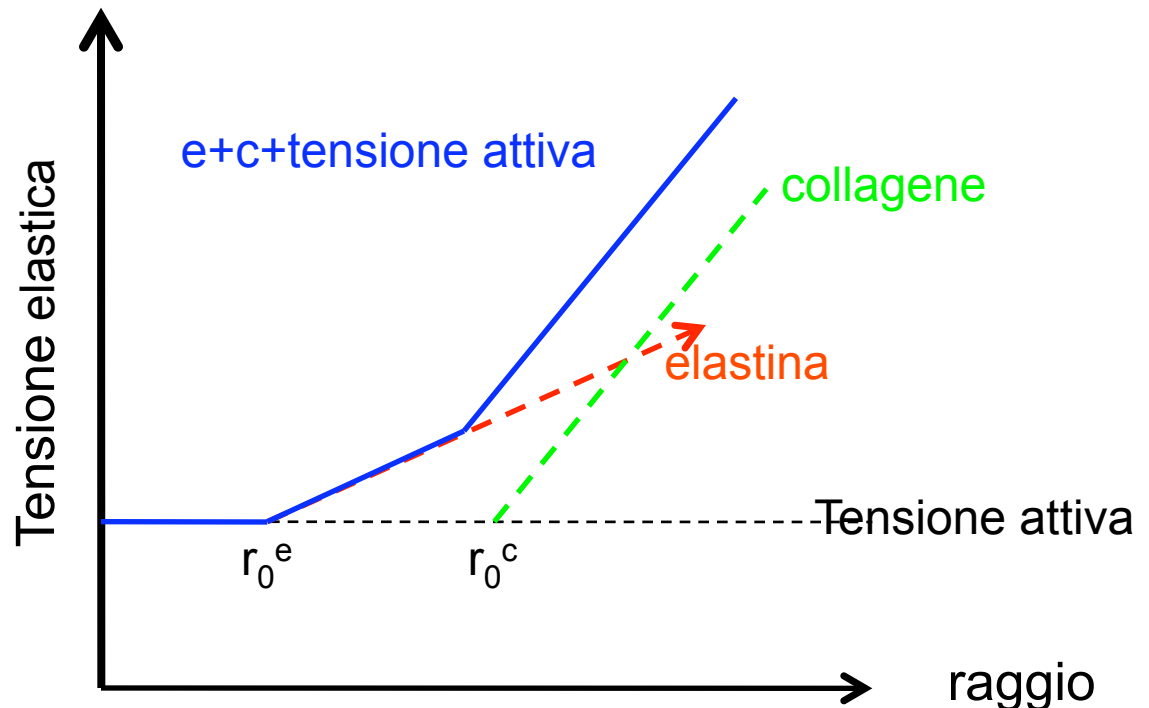
Per i vasi sanguigni, la legge di Hooke è espressa nella forma:

$$T(r) = \varepsilon \frac{r - r_0}{r_0}$$

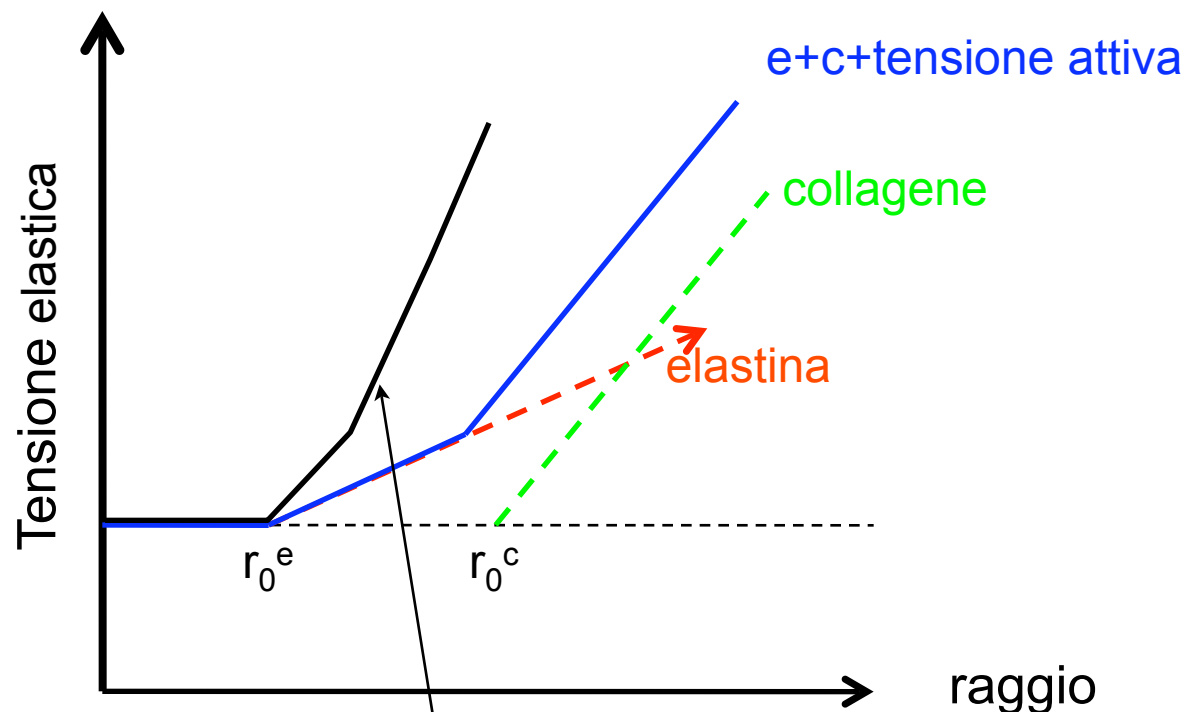
Dove $T(r)$ è la **tensione elastica**, cioè il rapporto tra l'intensità della forza elastica e la lunghezza del vaso, ε è lo spessore della parete, r_0 il raggio a riposo e r il raggio della fibra (e del vaso) sotto tensione.

In un vaso, l'andamento della tensione elastica in funzione del raggio dipende dalla presenza di tre contributi: **quello della tensione attiva (tono vasomotore)**, **quello delle fibre di elastina** e **quello delle fibre collagene**.

I vasi sono anche sottoposti ad una **tensione attiva** (tono muscolare) derivante dalle contrazioni della muscolatura liscia. La tensione attiva è indipendente dal raggio del vaso



La **velocità di propagazione della deformazione meccanica** della parete, aiuta il moto del sangue. In particolare la **velocità del sangue** è inversamente proporzionale alla velocità della deformazione meccanica (onda sfimica).



anziano - meno deformabile - da cui minor velocità del sangue e maggior pressione richiesta alla pompa cuore (ipertensione)

materiale	Y(N/m ²)	materiale	Y(N/m)
Acciaio	$2 \cdot 10^{11}$	Legno duro	$1 \cdot 10^{10}$
vetro	$7 \cdot 10^{10}$	tendine	$2 \cdot 10^7$
mattone	$2 \cdot 10^{10}$	Cartilagine (costole)	$1.2 \cdot 10^7$
Ossa(lungo L'asse-trazione)	$1.8 \cdot 10^{10}$	Gomma	$1 \cdot 10^6$
Ossa (lungo l'asse compressione)	$0.9 \cdot 10^{10}$	Vasi sanguigni	$2 \cdot 10^5$

- Se il modulo di Young è elevato, occorrono sforzi elevati per ottenere deformazioni piccole: **più è alto il modulo di Young, meno un corpo è deformabile elasticamente.**

materiale	Y(N/m ²)	materiale	Y(N/m)
Acciaio	$2 \cdot 10^{11}$	Legno duro	$1 \cdot 10^{10}$
vetro	$7 \cdot 10^{10}$	tendine	$2 \cdot 10^7$
mattone	$2 \cdot 10^{10}$	Cartilagine (costole)	$1.2 \cdot 10^7$
Ossa(lungo L'asse-trazione)	$1.8 \cdot 10^{10}$	Gomma	$1 \cdot 10^6$
Ossa (lungo l'asse compressione)	$0.9 \cdot 10^{10}$	Vasi sanguigni	$2 \cdot 10^5$

Elasticità delle ossa – compressione e trazione.

Il modulo di Young delle ossa è diverso per gli sforzi di trazione e di compressione:
nel primo caso il modulo è circa doppio.

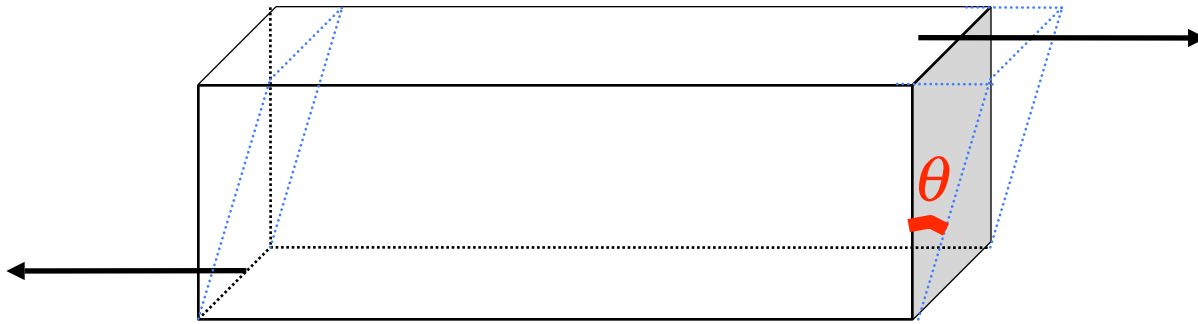
Le ossa quindi **sono più elastiche (deformabili) in compressione che in trazione.**
Questa differenza è legata alla particolare costituzione del tessuto osseo ed è in accordo con le esigenze funzionali.

Il modulo di Young per un femore umano è circa $1.6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ in trazione, $0.94 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ in compressione.

Per confronto, il modulo di Young dell'acciaio è di circa $2 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, quello di un tendine è $2 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$, quello della gomma è $1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, quello dei vasi sanguigni è dell'ordine di 10^5 N/m^2 .

Il carico di rottura di un femore umano è $16 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ in compressione e $12 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ in trazione, quello dell'acciaio è $50 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$.

Elasticità di taglio e torsione delle ossa.



Quando un corpo è soggetto ad una forza che agisce **tangenzialmente** su di una superficie, gli strati di cui è costituito tendono a scorrere su quelli sottostanti ed il corpo è soggetto ad uno **sforzo di taglio T**.

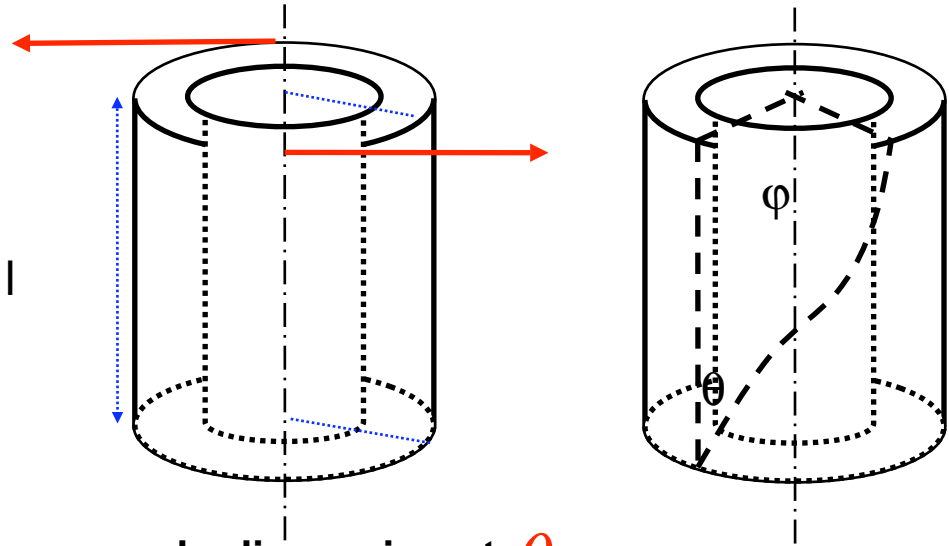
$$T = \frac{F}{S} = \mu \cdot \theta$$

Dove il **modulo di taglio** μ

e l'angolo di scorrimento θ equivale a:

$$\theta = \frac{\Delta l}{l}$$

Consideriamo un segmento di
osso cavo, di lunghezza l , raggio esterno r_c , raggio
interno r_i e spessore Δr .



All'angolo di torsione ϕ corrisponde un angolo di scorrimento θ .

$$\theta = \frac{r_c \cdot \phi}{l}$$

La **forza di taglio** necessaria per ottenere l'angolo di torsione φ è data da

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \varphi \cdot r_c^2 \cdot \Delta r}{l}$$

Quindi in un osso cavo il momento torcente necessario per ottenere una torsione di un angolo φ vale:

$$M_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \varphi \cdot r_c^3 \cdot \Delta r}{l}$$

In un **osso pieno**, invece, tale momento varrebbe:

$$M_p = \frac{\pi \cdot \mu \cdot \varphi \cdot r_p^4}{l}$$

A parità di raggio esterno, un osso pieno sarebbe più resistente alla torsione di uno cavo.

A parità di massa, e quindi di peso di tessuto osseo, un osso cavo è invece più resistente di uno pieno.

Infatti, se le due masse sono uguali, lo sono anche i due volumi

$$2 \cdot \pi \cdot r_c \cdot \Delta r \cdot l = \pi \cdot l \cdot r_p^2$$

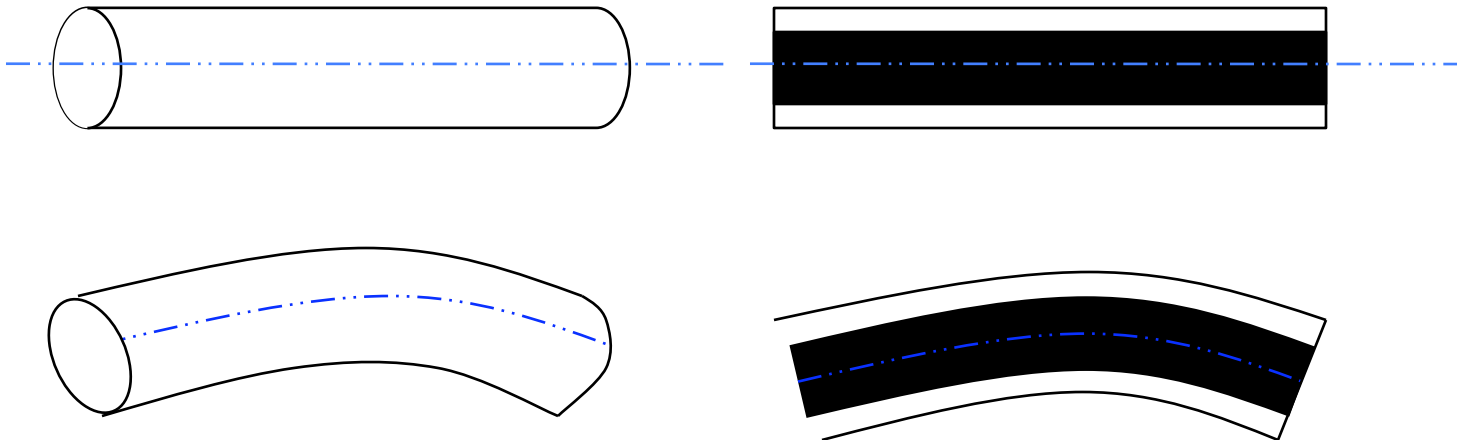
$$2 \cdot r_c \cdot \Delta r = r_p^2$$

con $\alpha > 1$, si ricava che:

$$M_c = 2 \cdot \alpha^2 \cdot M_p$$

Il valore ottimale del rapporto fra diametro esterno ed interno è 11/8, quello che si osserva nelle dialisi delle ossa lunghe.

Sforzo di flessione. E' la causa più frequente di frattura delle ossa.



Durante la flessione non tutte le fibre sono sollecitate allo stesso modo: quelle sul lato convesso sono sottoposte a trazione, quelle sul lato concavo compressione, quelle centrali sono poco sollecitate, quindi contribuiscono meno alla resistenza dell'osso.

A parità di massa ossea un osso cavo è più resistente anche alla flessione, rispetto ad uno pieno.

Anche in questo caso il rapporto ottimale tra diametro esterno ed interno è di $11/8$.

CONTRAZIONE MUSCOLARE

I muscoli trasformano energia chimica in lavoro meccanico.

Il rendimento è sempre inferiore al 100%, e parte dell'energia spesa viene dissipata sotto forma di calore.

Distinguiamo **due tipi** di contrazioni muscolari:

- **Isotoniche** quando il muscolo, compiendo un lavoro contro una forza esterna, si accorcia (o si allunga).
- **Isometriche** quando il muscolo si contrae per equilibrare una forza esterna, ma non si allunga né si accorcia.

Contrazioni isometriche.

- La **forza T (tensione)** sviluppata durante una contrazione è massima quando la lunghezza l del muscolo è uguale a quella a riposo l_0 .
- Se il muscolo è più accorciato o più stirato rispetto alla posizione di riposo la forza che sviluppa è minore.

Sul muscolo agisce anche una tensione passiva o tensione elastica, che per piccole deformazioni rispetta la legge di Hooke. Alla lunghezza di riposo la tensione passiva non è nulla, e se tagliamo un tendine il muscolo si accorcia di circa il 20%.

Contrazioni isotoniche.

Il muscolo si accorcia di un tratto Δl opponendosi ad una forza esterna F (**carico**).

- L'**accorciamento** Δl dipende dal carico: è nullo quando il **carico esterno** F eguaglia la forza (tensione) massima $T_{\max}$ che il muscolo può sviluppare ($F_{\max} = T_{\max}$), e massimo quando il carico è nullo:

$$\Delta l = \Delta l_{\max} \times \frac{F_{\max} - F}{F_{\max}}$$

Notare che:

- 1) la dipendenza dell'accorciamento dal carico è lineare;
- 2) il lavoro compiuto dal muscolo è:

$$L = F \times \Delta l = F \times \Delta l_{\max} \times \frac{F_{\max} - F}{F_{\max}}$$

Quindi il lavoro è massimo quando $F = \frac{1}{2} \times F_{\max}$

- La **potenza** sviluppata dal muscolo (per compiere il lavoro meccanico) è data da:

$$P = \frac{L}{t} = F \times v$$

Quindi anche la potenza prodotta è massima quando

$$F = \frac{1}{2} \times F_{\max}$$

La velocità di contrazione dipende dal carico secondo la **relazione di Hill**:

$$v = b \times \frac{F_{\max} - F}{F + a} \quad \text{dove } b \text{ ed } a \text{ sono due costanti.}$$

Parte della potenza assorbita (energia consumata nell'unità di tempo) corrisponde alla **potenza prodotta** (lavoro utile nell'unità di tempo), **parte viene dissipata per produrre calore.**

Siccome il calore Q prodotto in una contrazione isotonica è indipendente dalla velocità di contrazione, la potenza spesa per produrre calore cresce linearmente con la velocità di contrazione, e dipende dal carico.

$$P_Q = \frac{Q}{t} = \frac{Q \times v}{\Delta l} = \frac{Q}{\Delta l} \times b \times \frac{F_{\max} - F}{F + a}$$