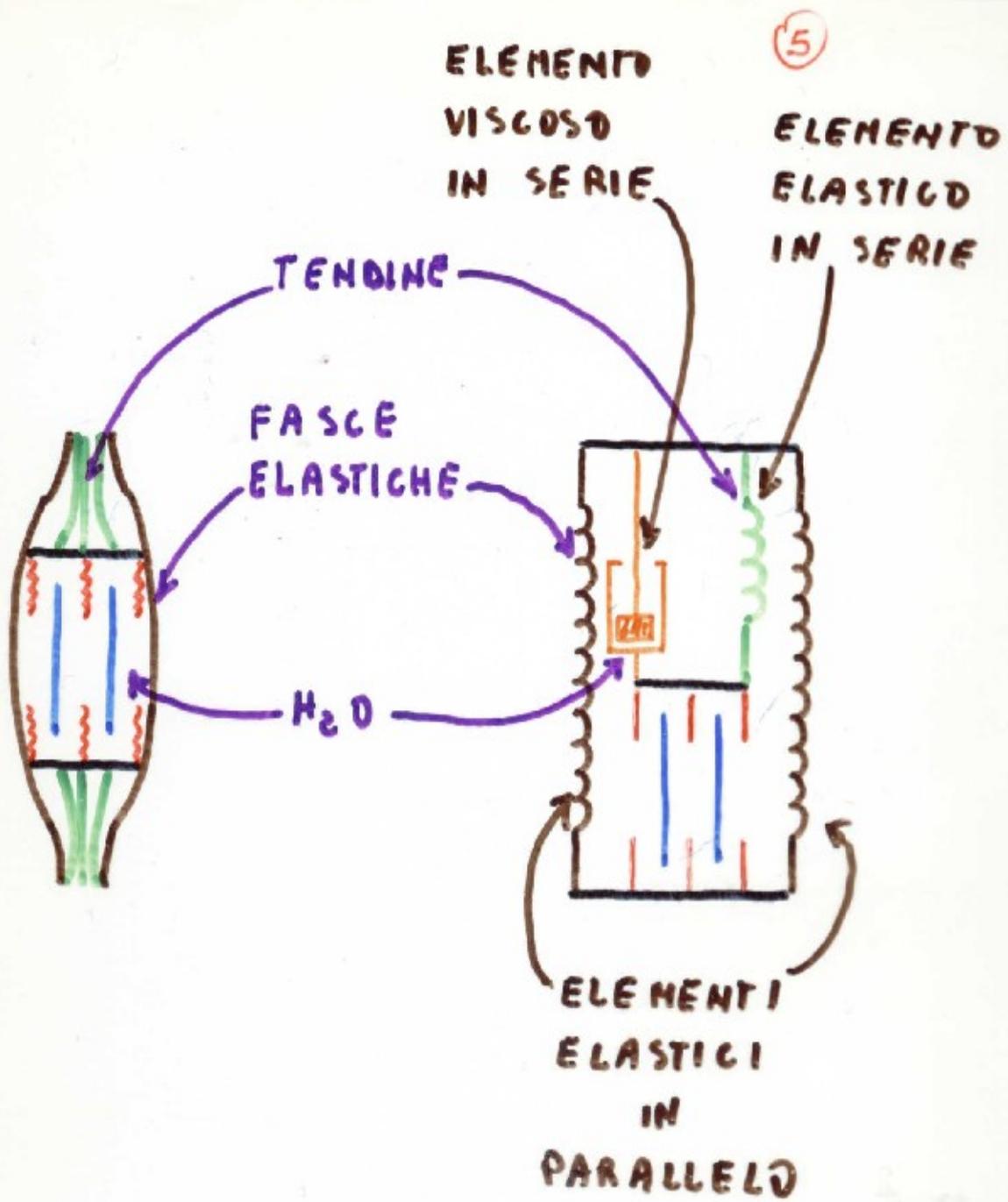


**LE PROPRIETA' MECCANICHE
DEI MATERIALI COSTITUENTI
LE STRUTTURE MUSCOLO-
TENDINEE**



IL MODELLO MECCANICO DEL MUSCOLO

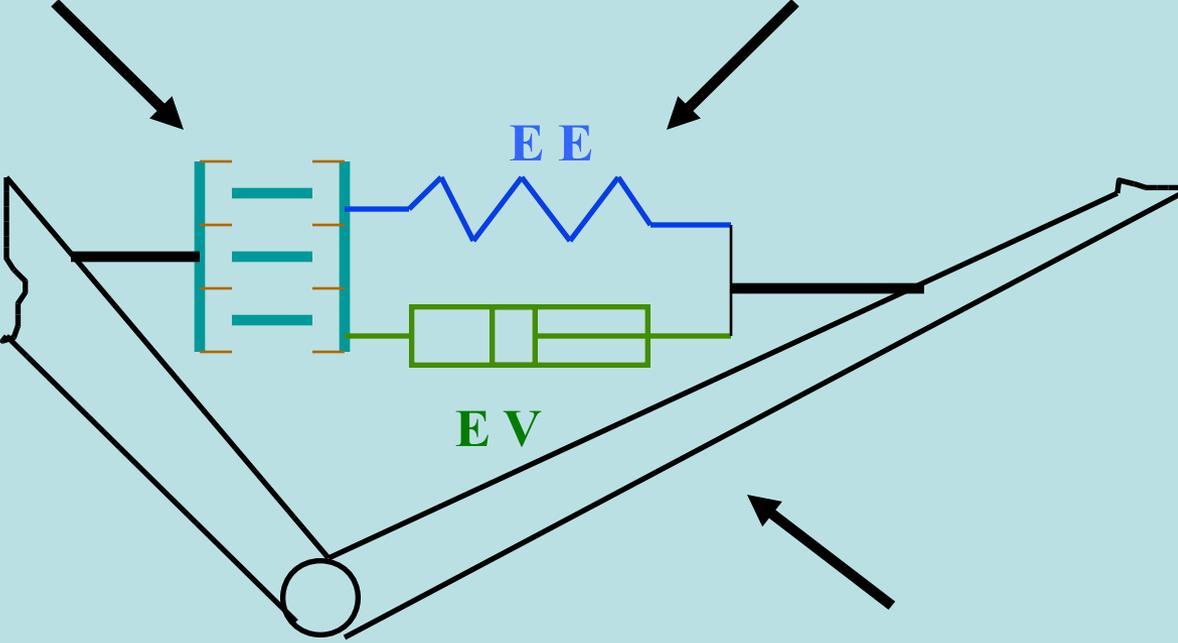
Il muscolo è una struttura deformabile che, sotto il profilo meccanico, può essere rappresentata da elementi elastici connessi in parallelo (fasce endoteliali) ed in serie (tessuto connettivo-elastico dei tendini) al sistema contratile, e da un elemento viscoso (fluidi intrinseci al muscolo) connesso in serie allo stesso sistema contratile.

MODELLO MECCANICO DEL SISTEMA MUSCOLO-TENDINE

Il modello meccanico è composto da un motore (gli elementi contrattili) che è connesso all'attuatore (la leva ossea) tramite un elemento viscoso (EV) ed un elemento elastico (EE), tra loro connessi in parallelo (il tendine)

MUSCOLO

TENDINE



LEVA OSSEA

IL TENDINE COME ELEMENTO ATTENUATORE DELLA FORZA MUSCOLARE

Compatibilmente con la lunghezza di riposo i sarcomeri producono sempre il massimo della forza muscolare (*stato attivo*)

Tuttavia un singolo impulso di forza viene attenuato dal tendine così che alla leva ossea ne arriva solo una frazione (*scossa semplice*)

IL TENDINE COME AMPLIFICATORE DI FORZA MUSCOLARE

Con l'aumentare della frequenza degli impulsi aumenta anche la frazione dello stato attivo che si trasmette alla leva ossea

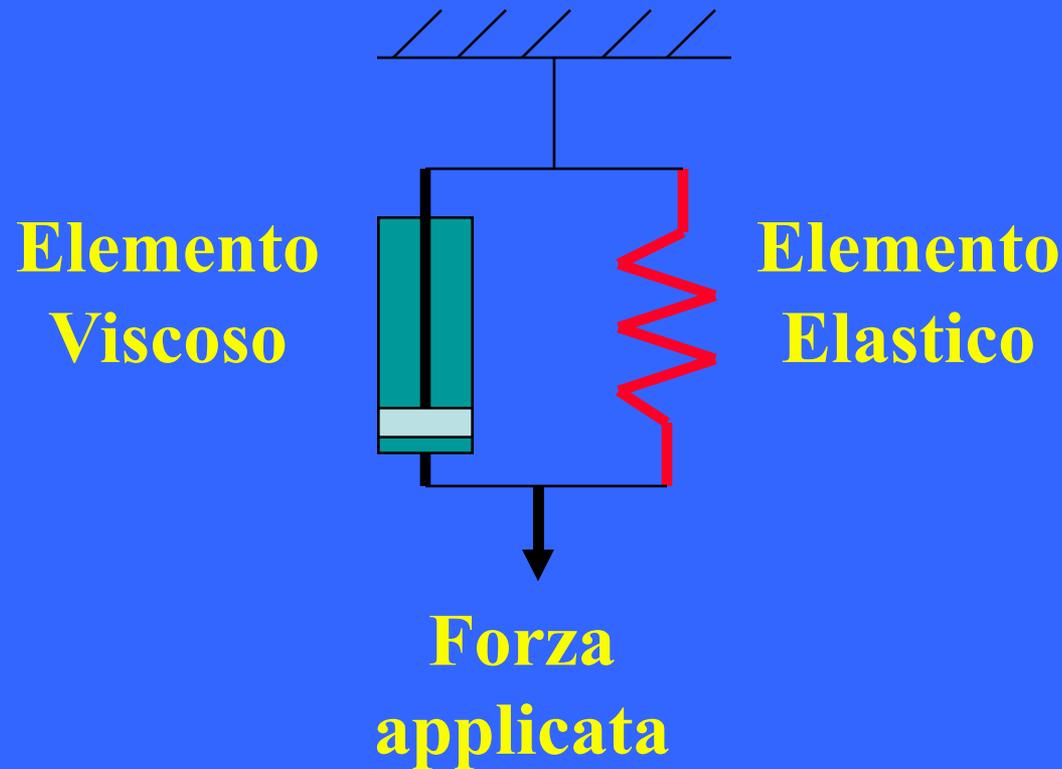
Quando la frequenza di pulsazione raggiunge un determinato valore (*frequenza di fusione*) tutta la forza dello stato attivo

viene trasmessa dal tendine alla leva ossea (*tetano completo*)

SISTEMA MECCANICO IN PARALLELO

In un sistema meccanico in cui i vari elementi sono disposti in parallelo la deformazione in lunghezza che ciascuno di essi subisce a causa di una forza applicata a trazione è identica

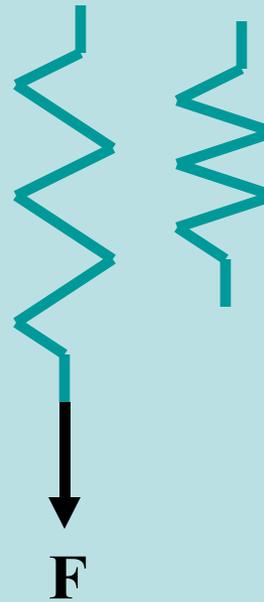
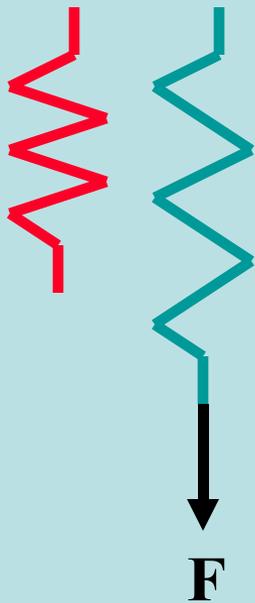
PARALLELO MECCANICO TRA UN ELEMENTO VISCOSO ED UN ELEMENTO ELASTICO

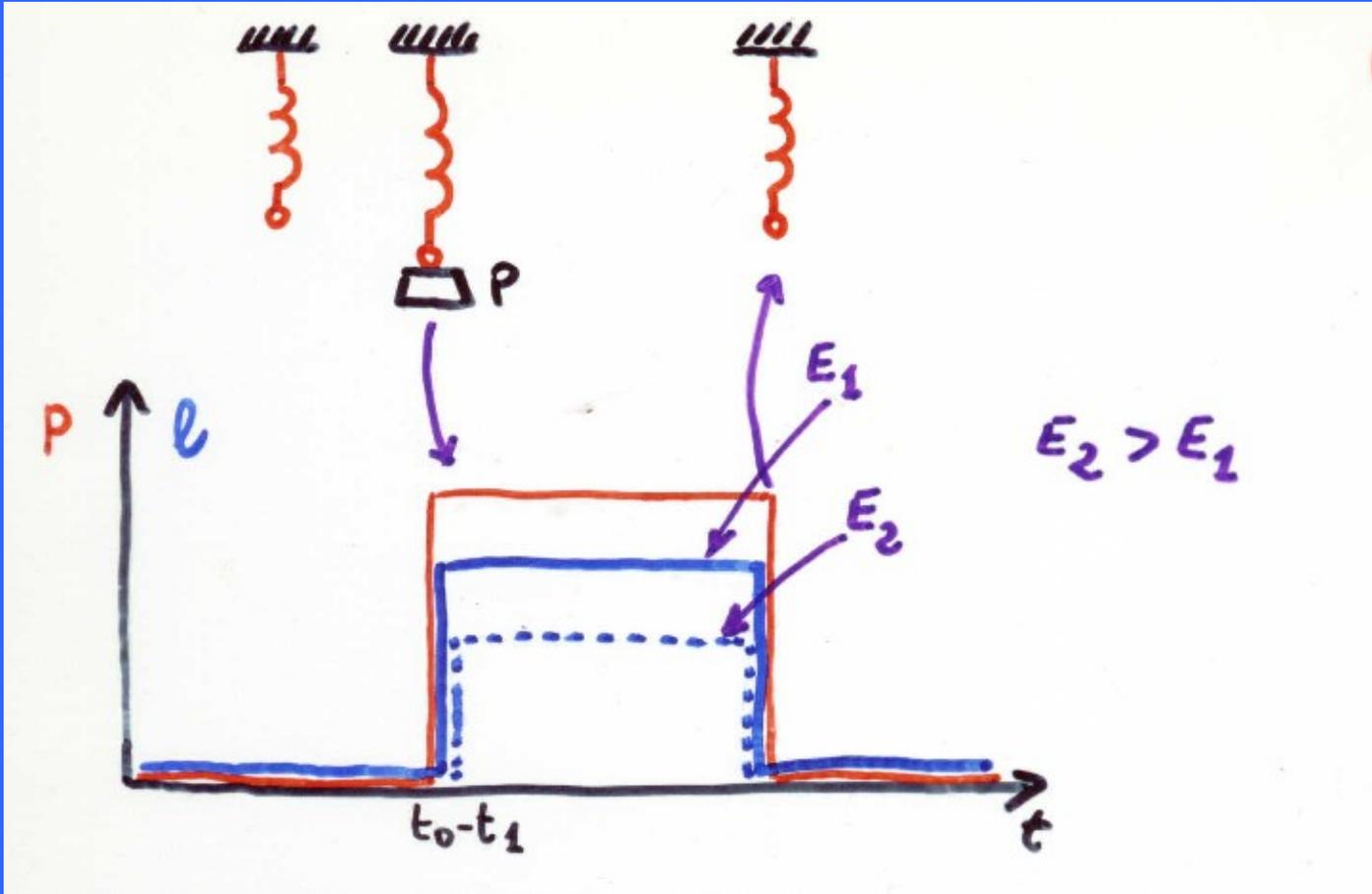


DEFORMAZIONE IN FUNZIONE DEL TEMPO DI UN CORPO ELASTICO

Quando un corpo elastico viene sottoposto all'azione di un impulso di forza esso si deforma istantaneamente

Quando l'azione dell'impulso di forza cessa il corpo elastico recupera istantaneamente la sua lunghezza di riposo

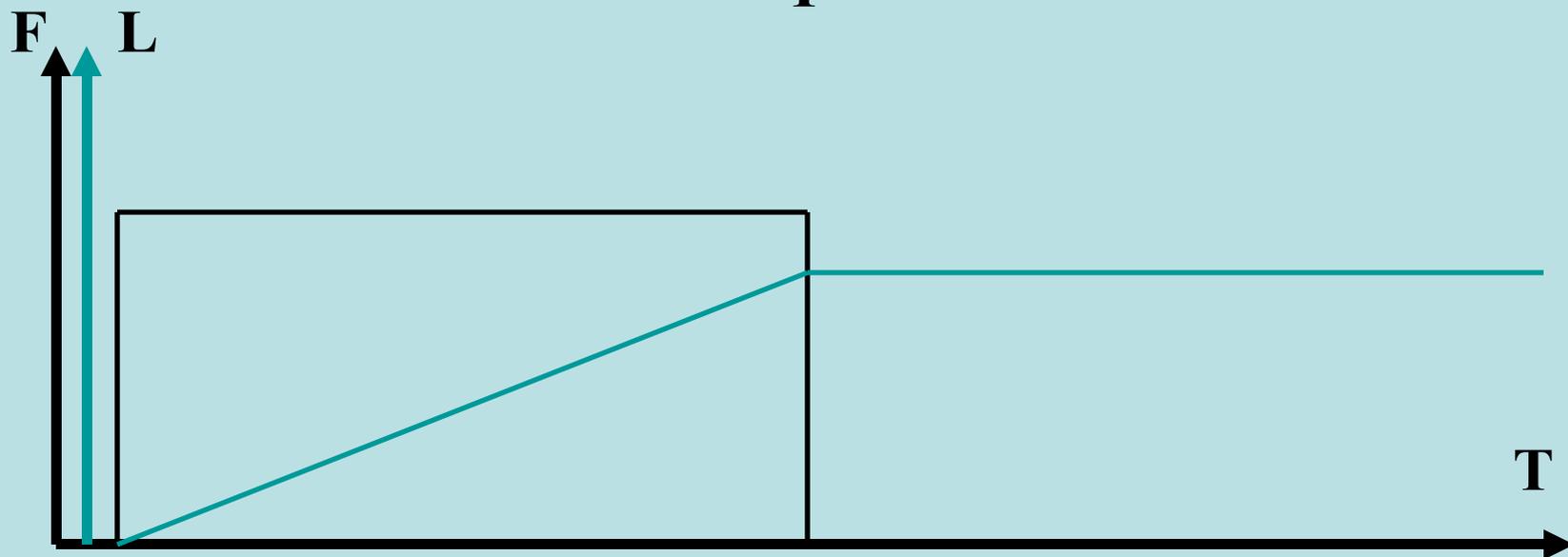
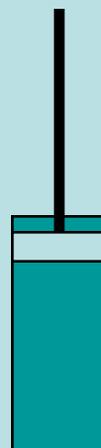
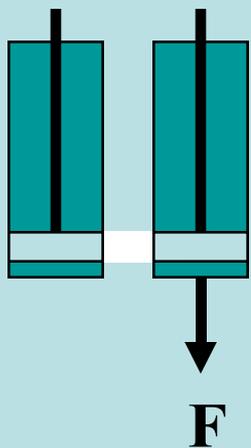


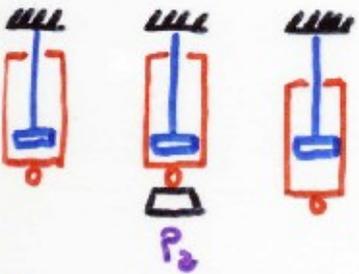
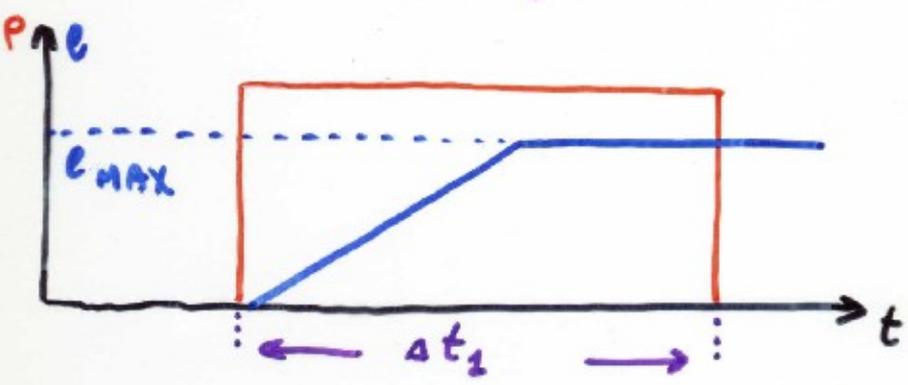
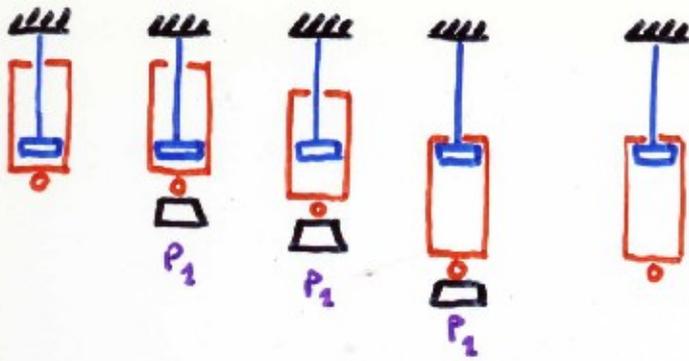


DEFORMAZIONE IN FUNZIONE DEL TEMPO DI UN CORPO VISCOSO

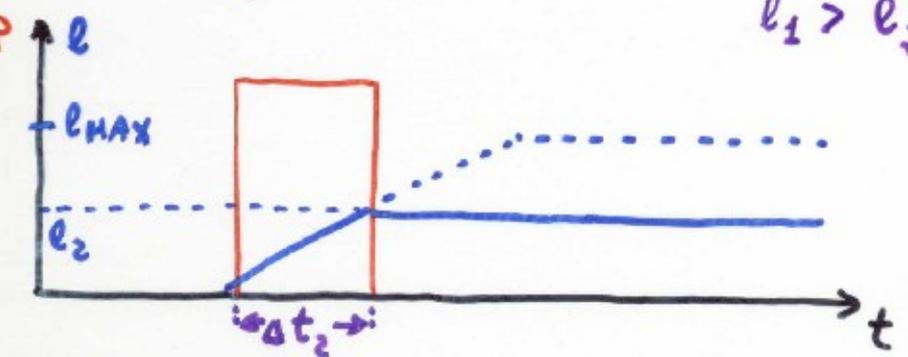
Quando un corpo viscoso viene sottoposto all'azione di un impulso di forza prima che esso raggiunga la massima deformazione passa un certo tempo (*costante di tempo*) che è funzione della sua viscosità

Quando l'azione dell'impulso di forza cessa il corpo viscoso mantiene la lunghezza raggiunta



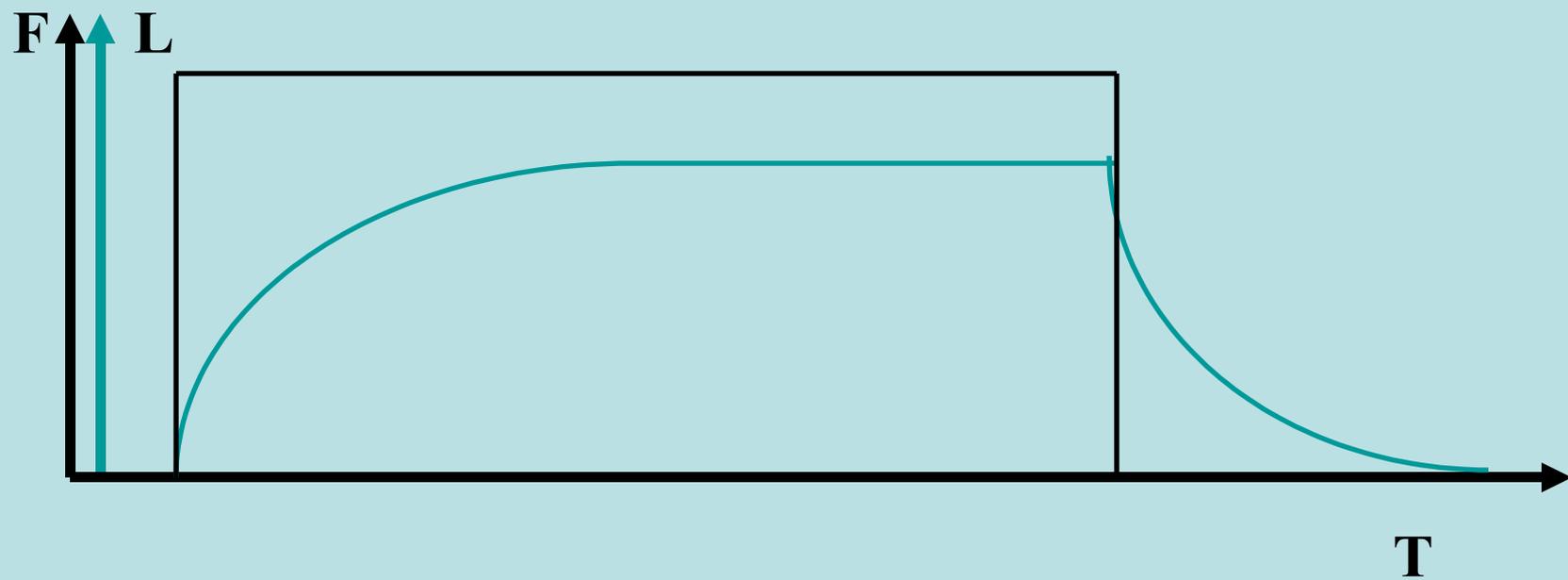
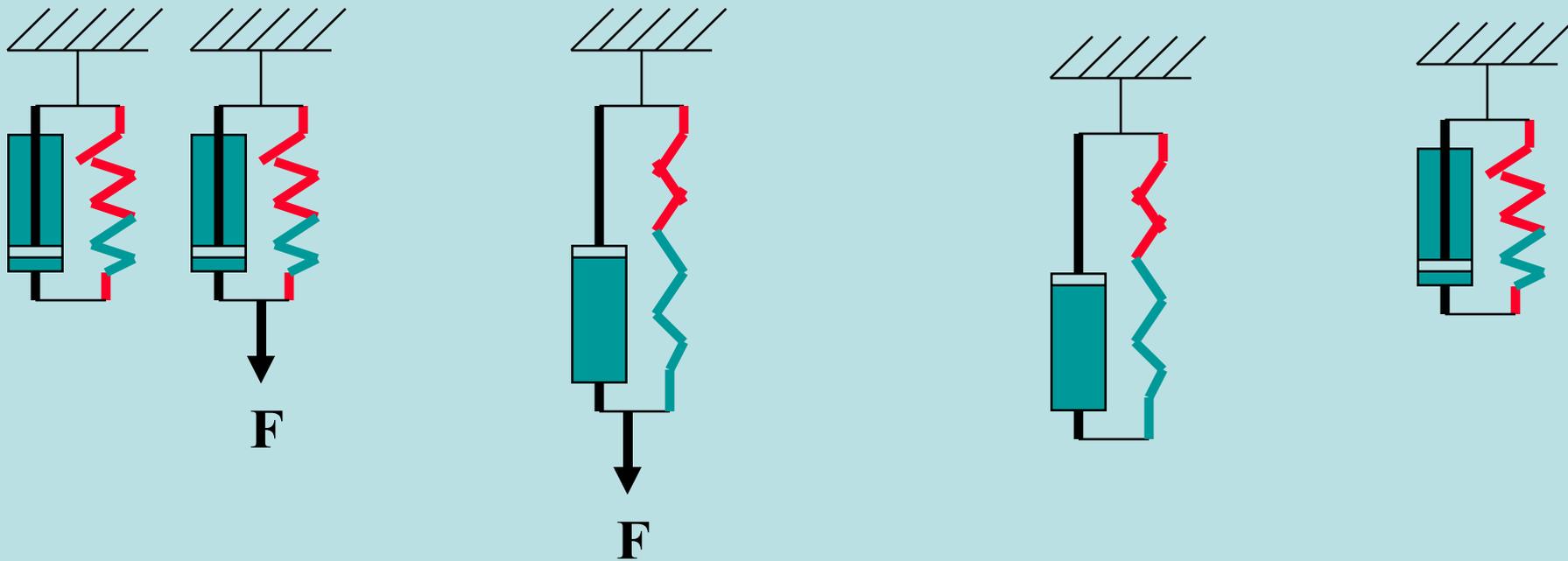


$P_1 = P_2$
 $\Delta t_1 > \Delta t_2$
 $l_1 > l_2$



COMPORTAMENTO MECCANICO DEL SISTEMA VISCOSO-ELASTICO IN PARALLELO

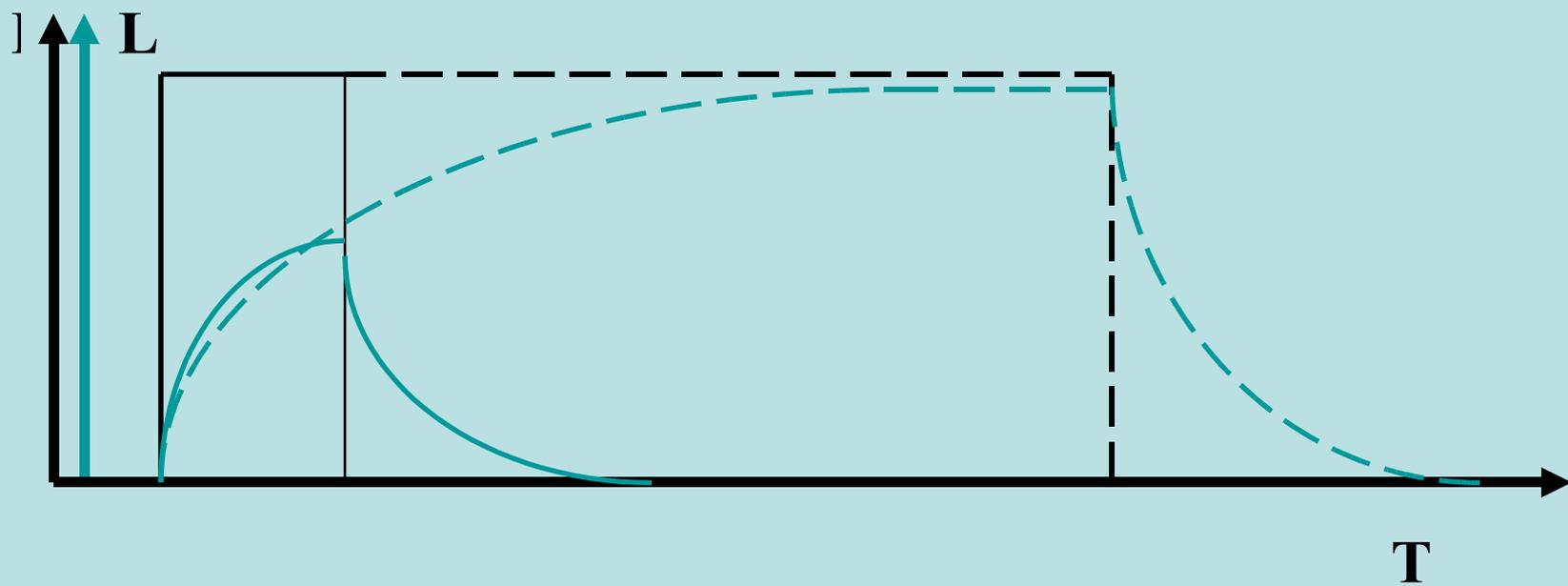
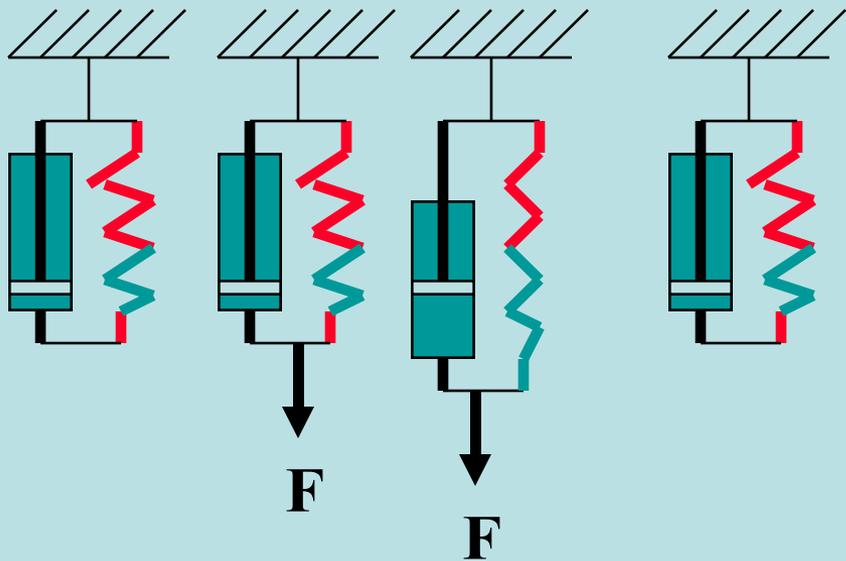
Quando ad un capo del parallelo meccanico tra elementi viscosi ed elastici viene applicato un impulso di forza la tendenza a trasmetterla istantaneamente alla leva ossea, tipica dell'elemento elastico, viene ostacolata dal ritardo caratteristico dell'elemento viscoso



IL SISTEMA VISCOSO-ELASTICO IN PARALLELO COME FILTRO MECCANICO PASSA-BASSO

Il parallelo meccanico tra elementi viscosi ed elastici costituisce un filtro passa-basso per un impulso di forza in ingresso

Cioè quanto più è breve la durata dell'impulso (elevata la sua frequenza di pulsazione) tanto più esso viene tagliato in uscita



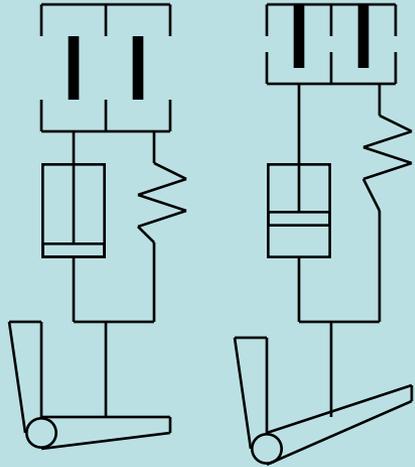
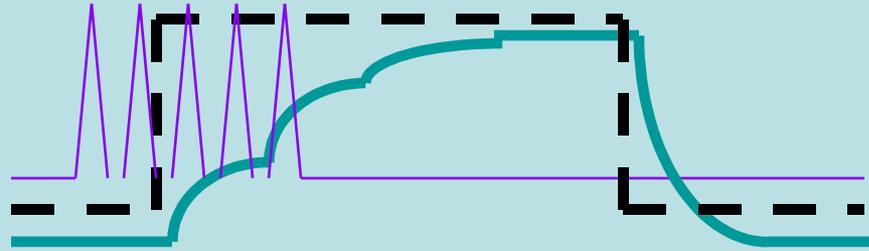
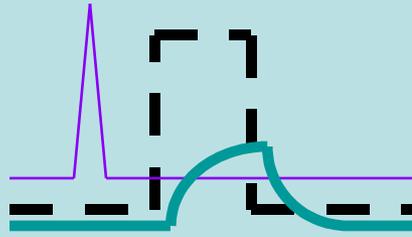
IL TENDINE COME TRASDUTTORE DA MODULAZIONE DI FREQUENZA A MODULAZIONE DI AMPIEZZA

Se la frequenza dei potenziali d'azione è sufficientemente elevata, un nuovo impulso di forza verrà applicato al filtro tendineo passa-basso prima che la deformazione prodotta dal precedente impulso venga recuperata

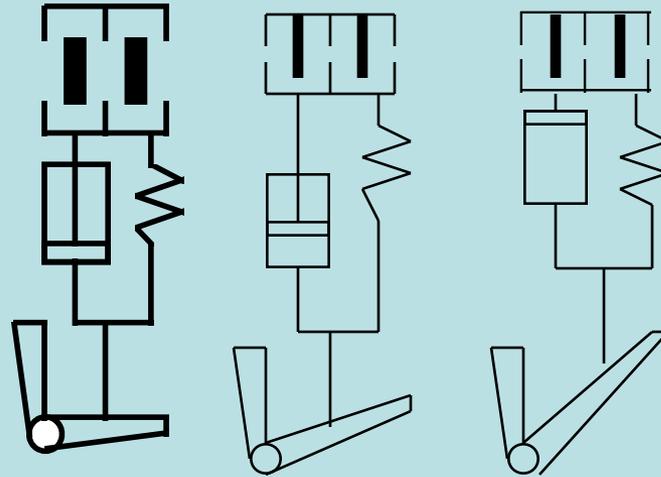
Allora si avrà la sommazione degli effetti meccanici sulla leva ossea

- - Input Passa-basso

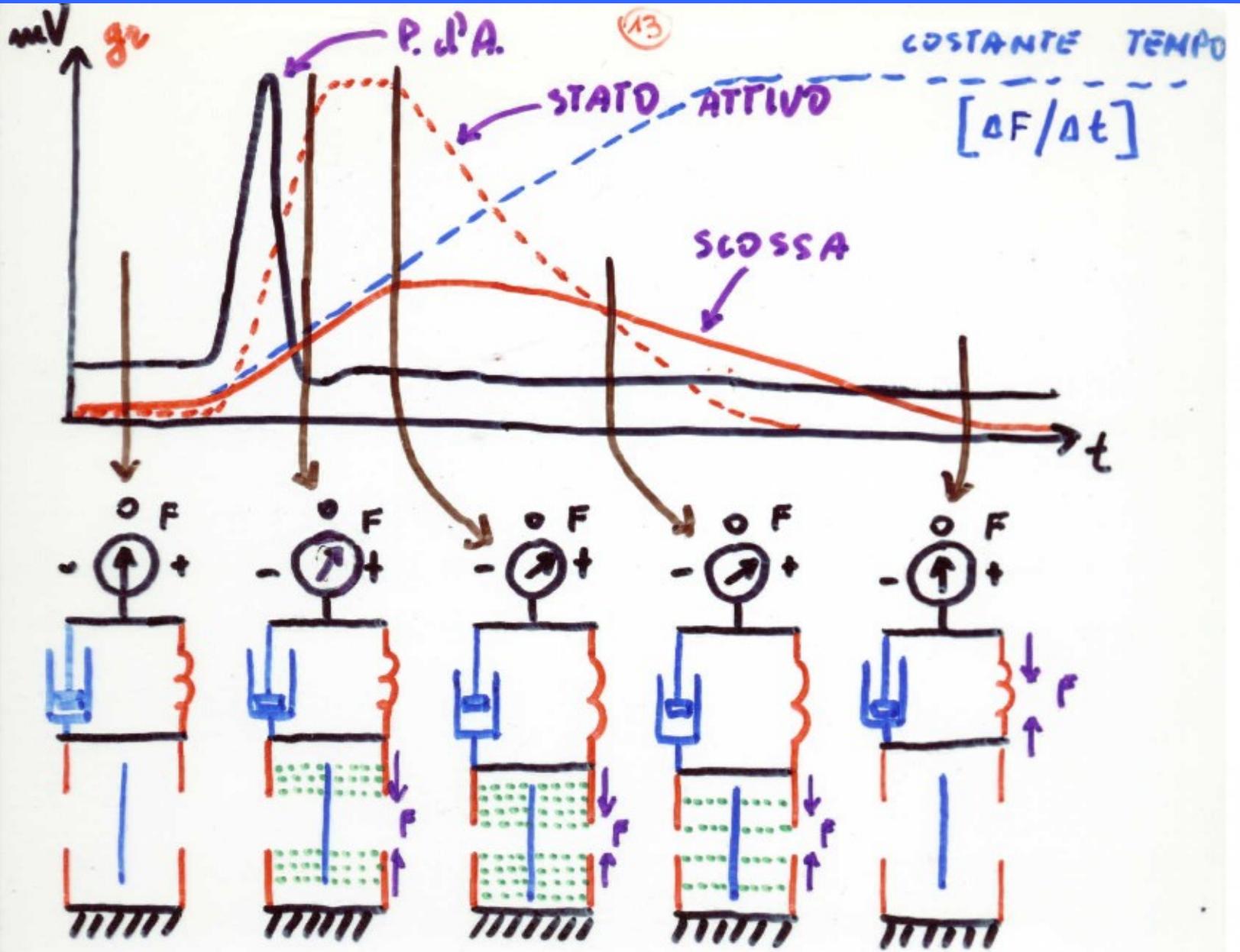
— Output Passa-basso

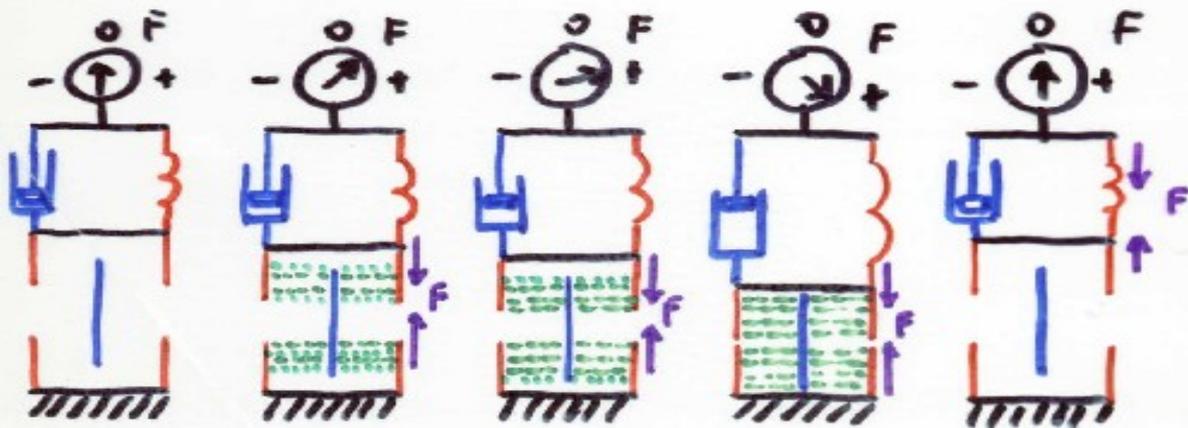
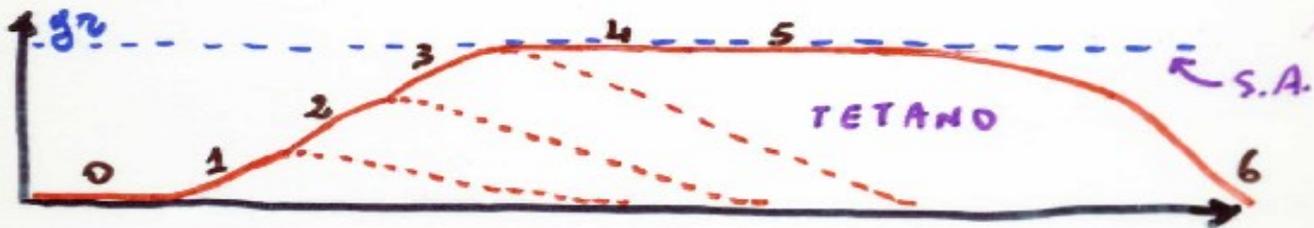
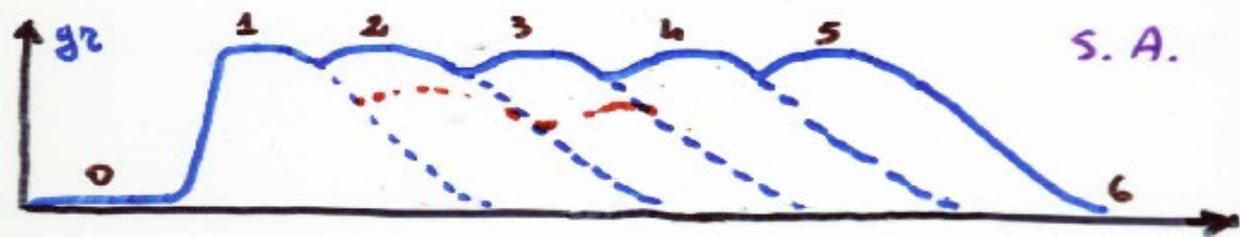
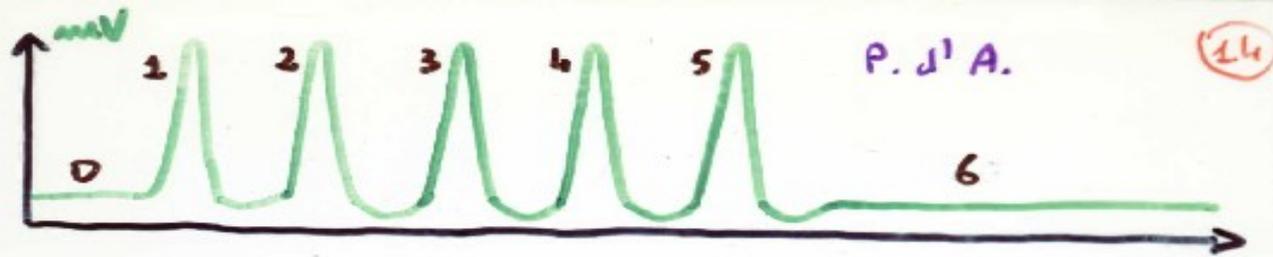


**SCOSSA
SEMPLICE**



**TETANO
COMPLETO**





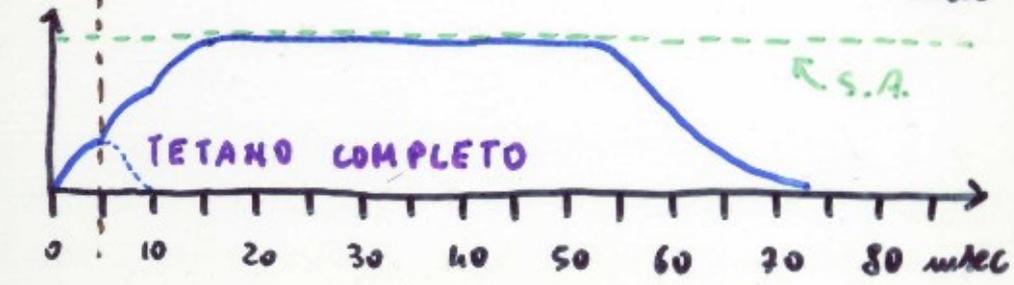
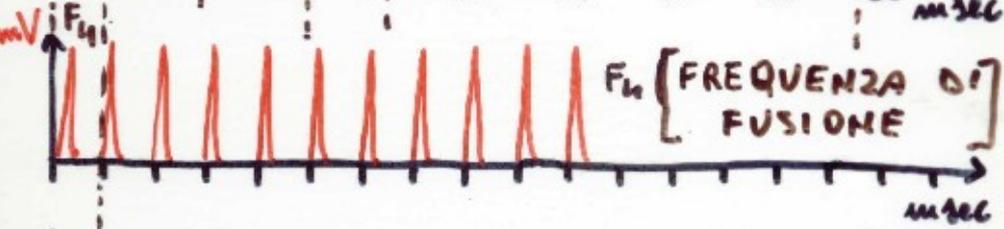
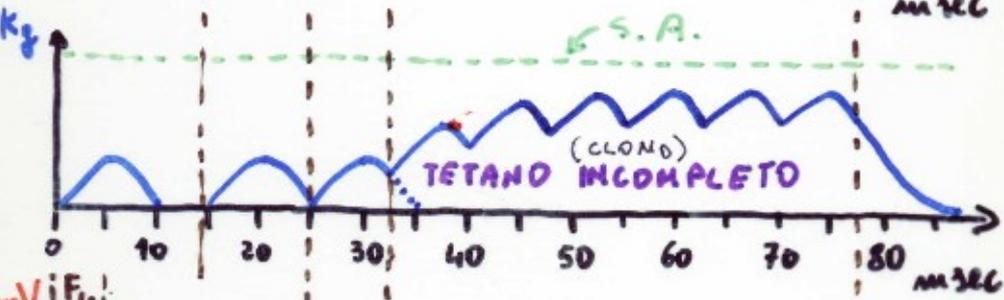
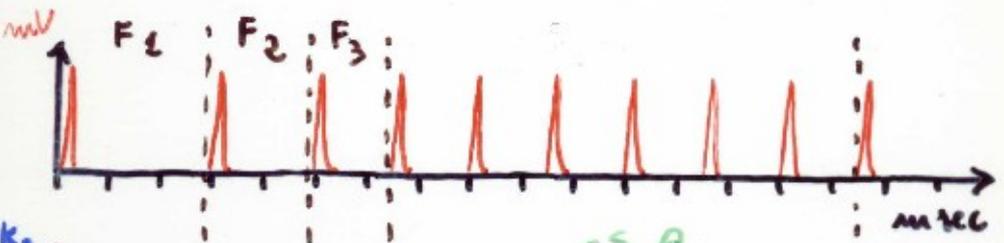
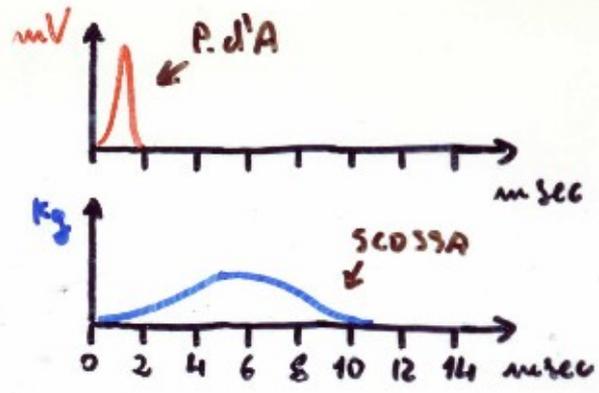
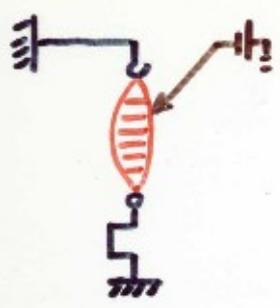
↑
0

↑
1

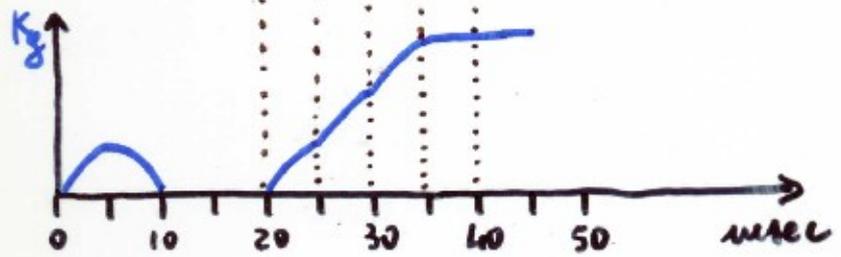
↑
2

↑
3-4-5

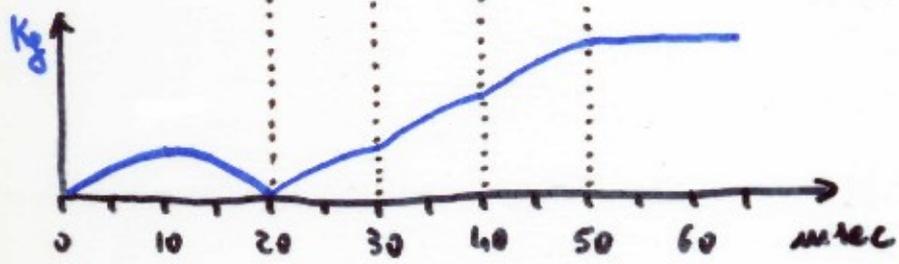
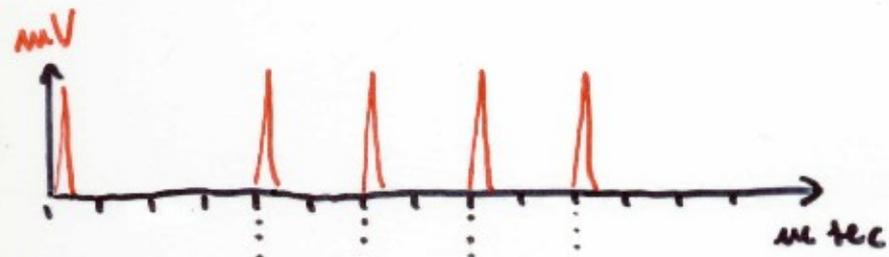
↑
6



$$F = \frac{1}{T(\text{sec})}$$



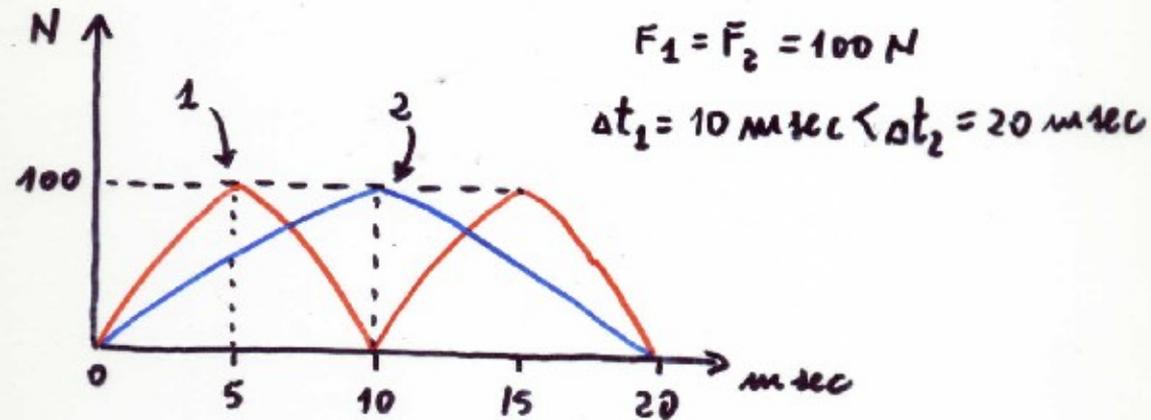
F. FUSIONE = 200 H₂ [MUSCOLO RAPIDO]



F. FUSIONE = 100 H₂ [MUSCOLO LENTO]

[VALORI REALI F.F. = 15 ÷ 60 H₂]

ENERGIA MECCANICA MUSCOLARE } → POTENZA MUSCOLARE } → FREQUENZA DI FUSIONE }



$$F.F._1 = \frac{1}{0,005} = 200 \text{ Hz} > F.F._2 = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ Hz}$$

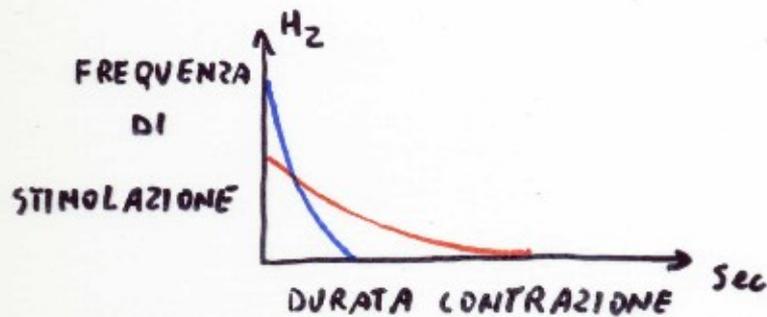
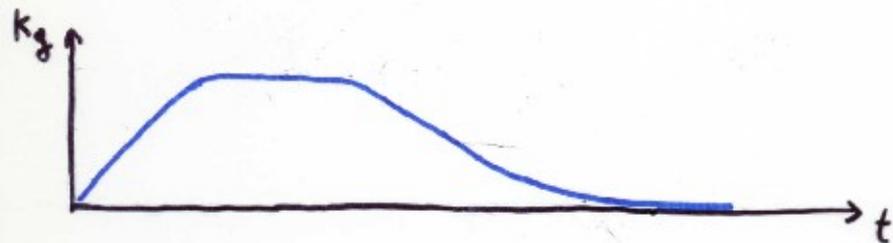
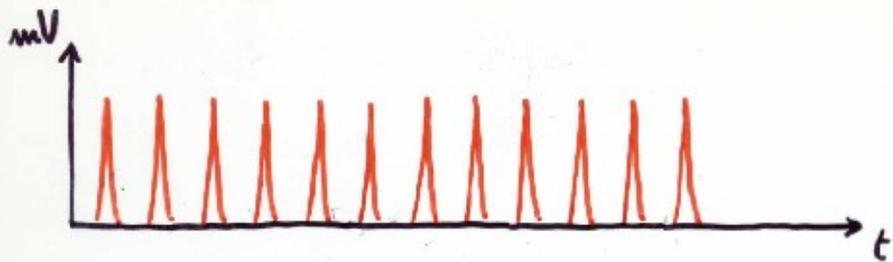
$$W \propto \frac{F}{\Delta t} \quad F.F. \propto \frac{1}{\Delta t}$$

$$F = \text{cost.} \rightarrow W \propto F.F.$$

$$F.F._1 > F.F._2 \rightarrow W_1 > W_2 \rightarrow E_1 > E_2$$

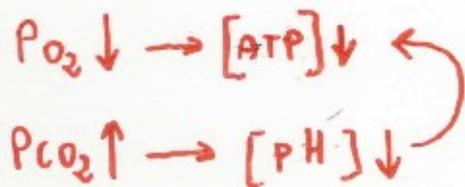
I MUSCOLI RAPIDI SONO PIÙ POTENTI E POSSONO SVILUPPARE PIÙ ENERGIA DEI MUSCOLI LENTI DI UGUALE SEZIONE.

FATICA MUSCOLARE

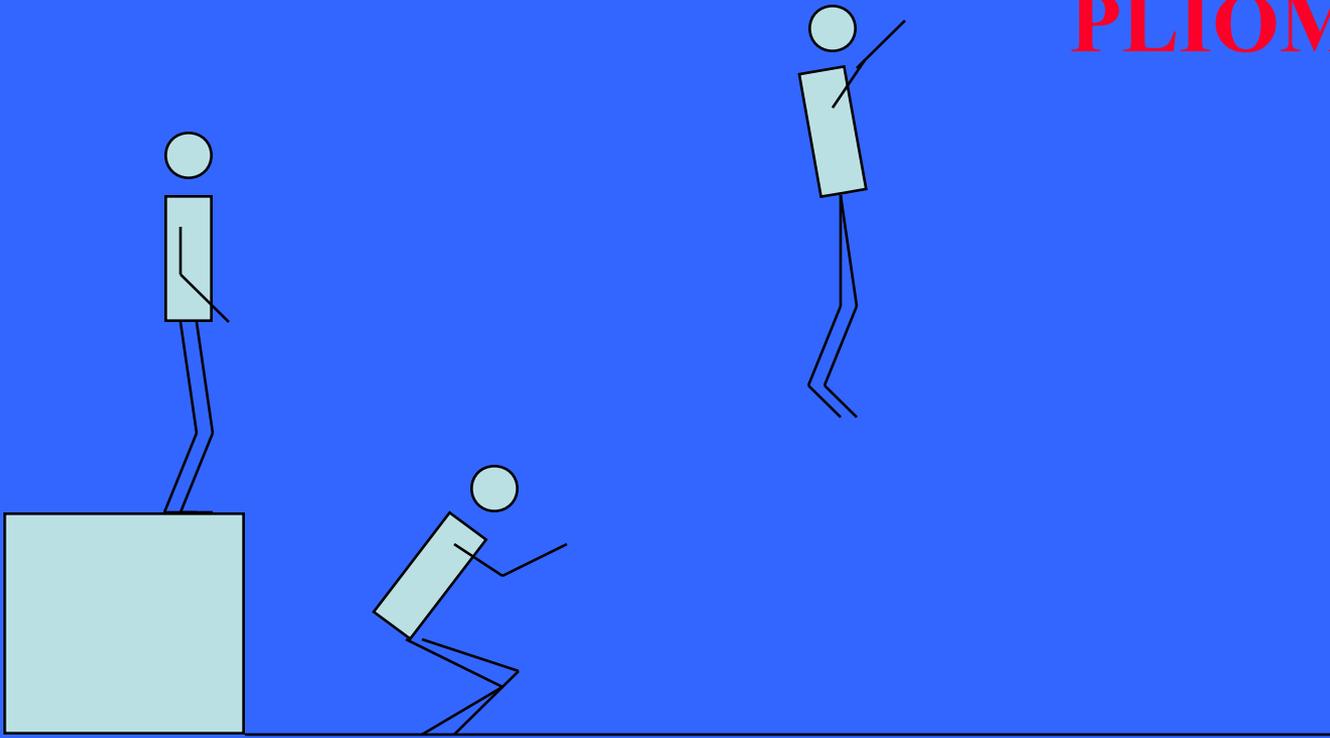


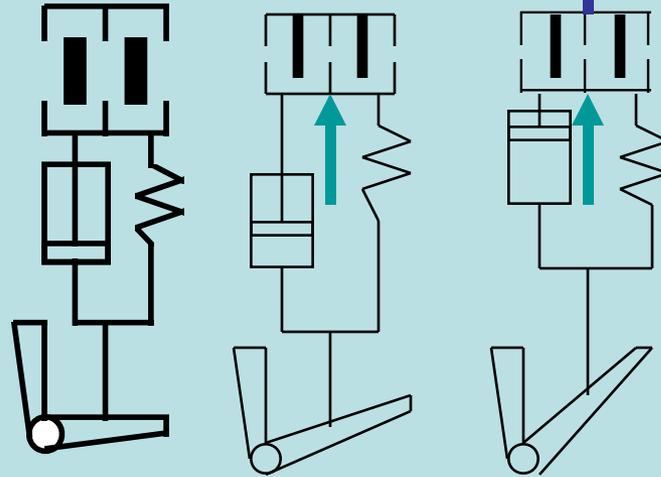
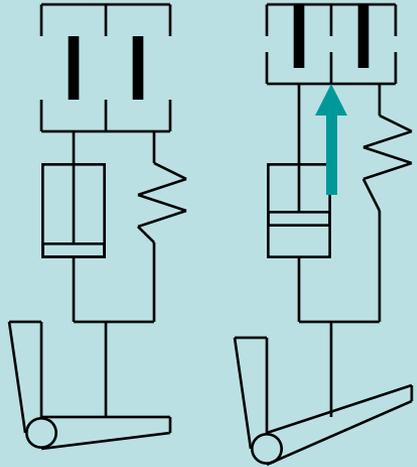
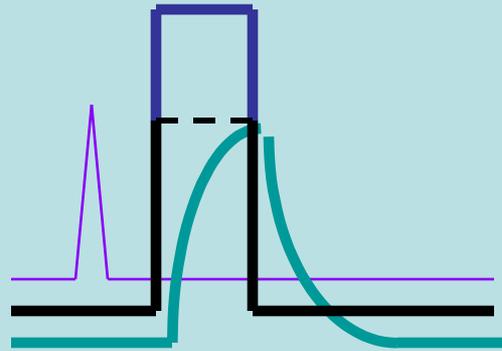
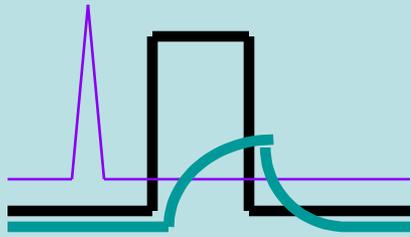
1) ESAURIMENTO MEDIATORE CHIMICO.

2) RIDUZIONE FLUSSO EMATICO PER AUMENTATA RESISTENZA VASALE, DA CUI:



PLIOMETRIA





**SCOSSA
SEMPLICE**

**POST
CARICAMENTO**

Forze interne di reazione ad uno stimolo deformante applicato a trazione/compressione ad un provino di materiale solido

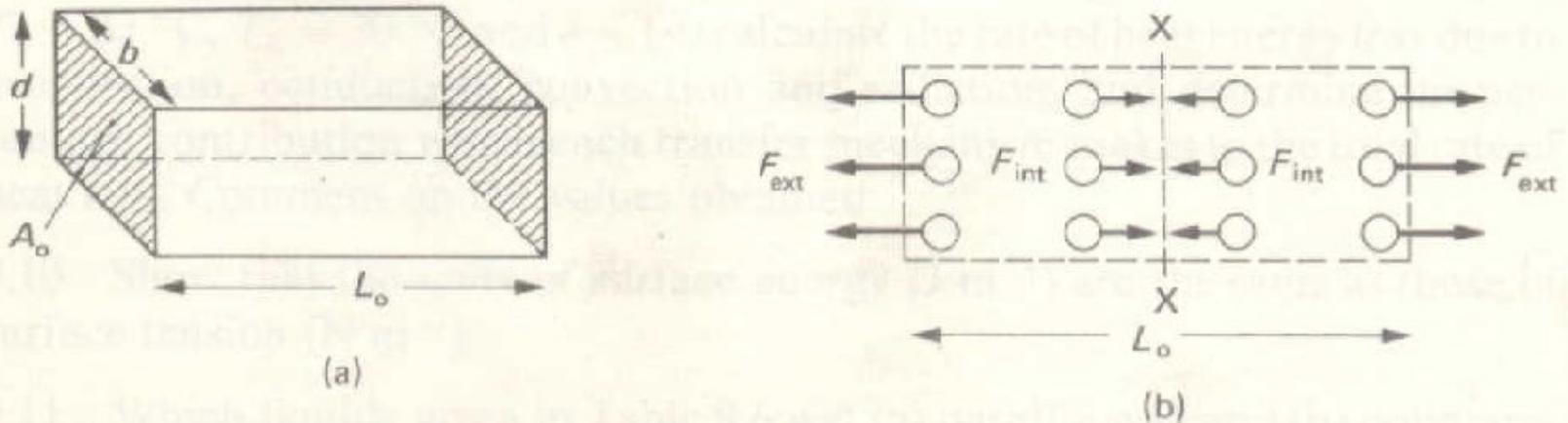


Figure 10.1 (a) An undeformed bar with rectangular cross section. (b) The internal (interatomic) forces F_{int} that oppose the external force F_{ext} .

Equilibrio: $F_{int} = F_{ext}$ \longrightarrow

Deformazione

$$L_x > 0 < L_0$$

Diversi tipi di deformazione in funzione del punto di applicazione della forza

A) Deformazione a taglio con variazione della forma e mantenimento del volume

B) Deformazione a compressione con mantenimento della forma e riduzione del volume

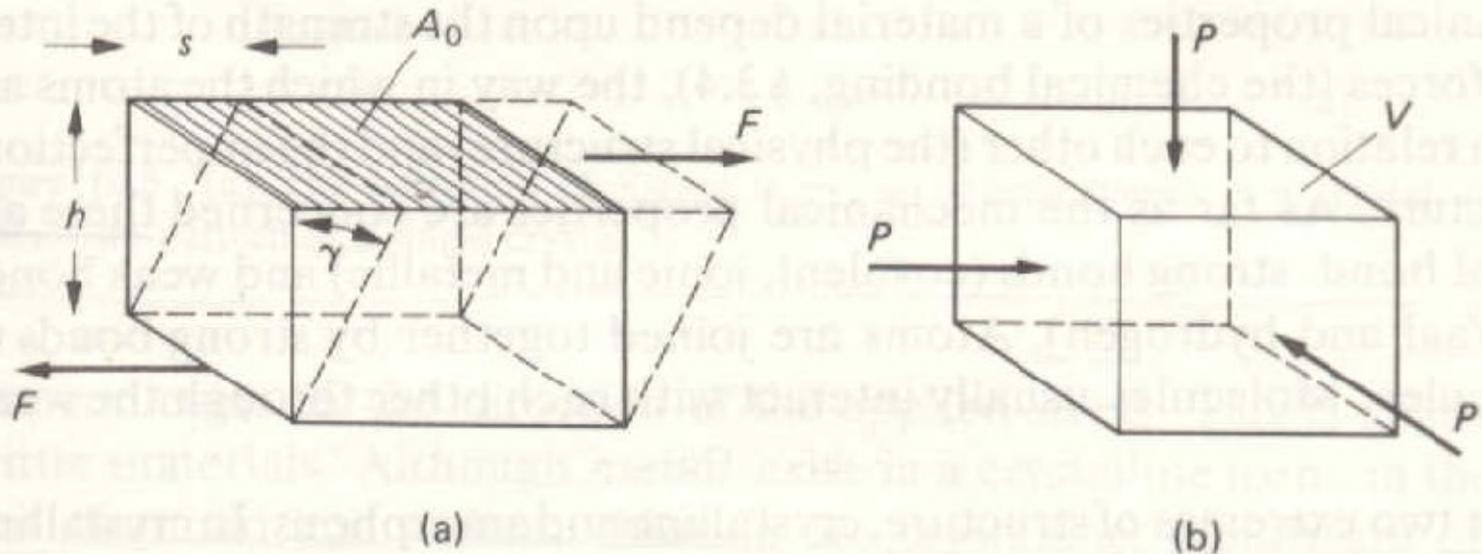


Figure 10.4 (a) Shear deformation. (b) Volume (bulk) deformation.

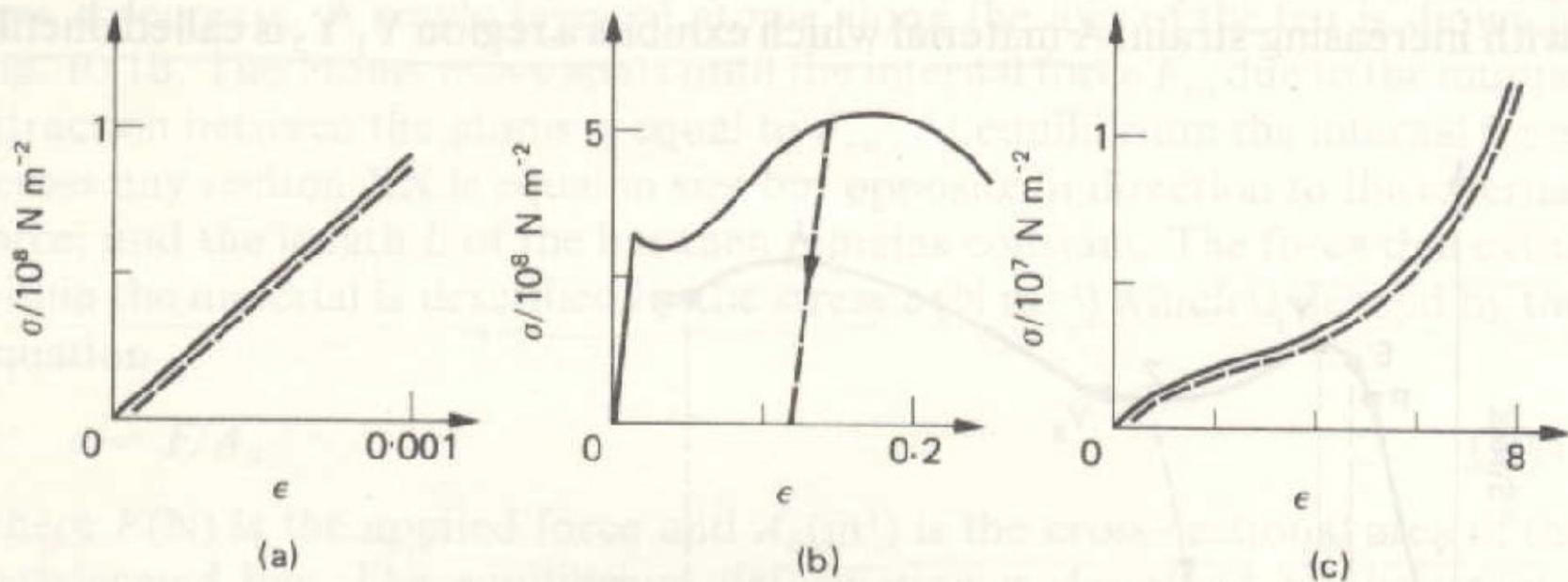


Figure 10.3 Stress-strain diagrams for different classes of material. (a) Silica glass, brittle. (b) Annealed mild steel, ductile. (c) Natural rubber vulcanizate, rubbery. (The unloading curves are indicated by the broken lines.)

Curve di carico (linea continua) e scarico (linea spezzata) di diversi tipi di materiali sottoposti a stress.

(a) vetro; (b) acciaio; (c) gomma.

Tipica struttura del collageno*

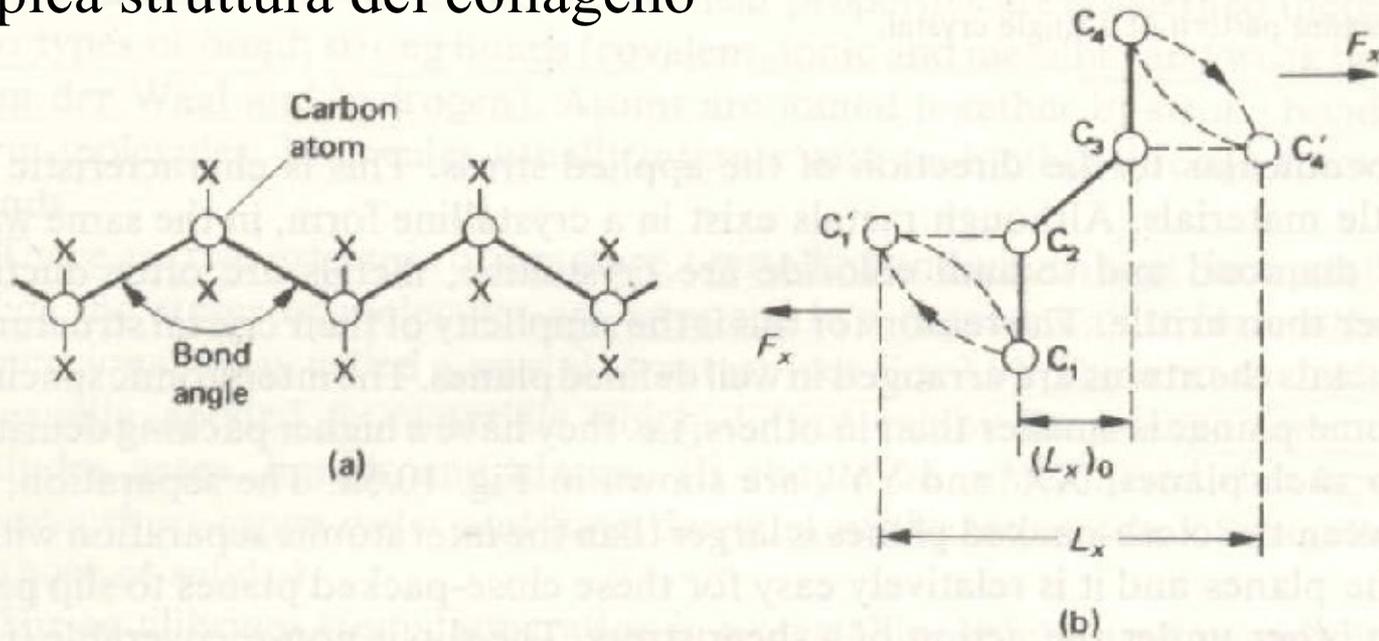
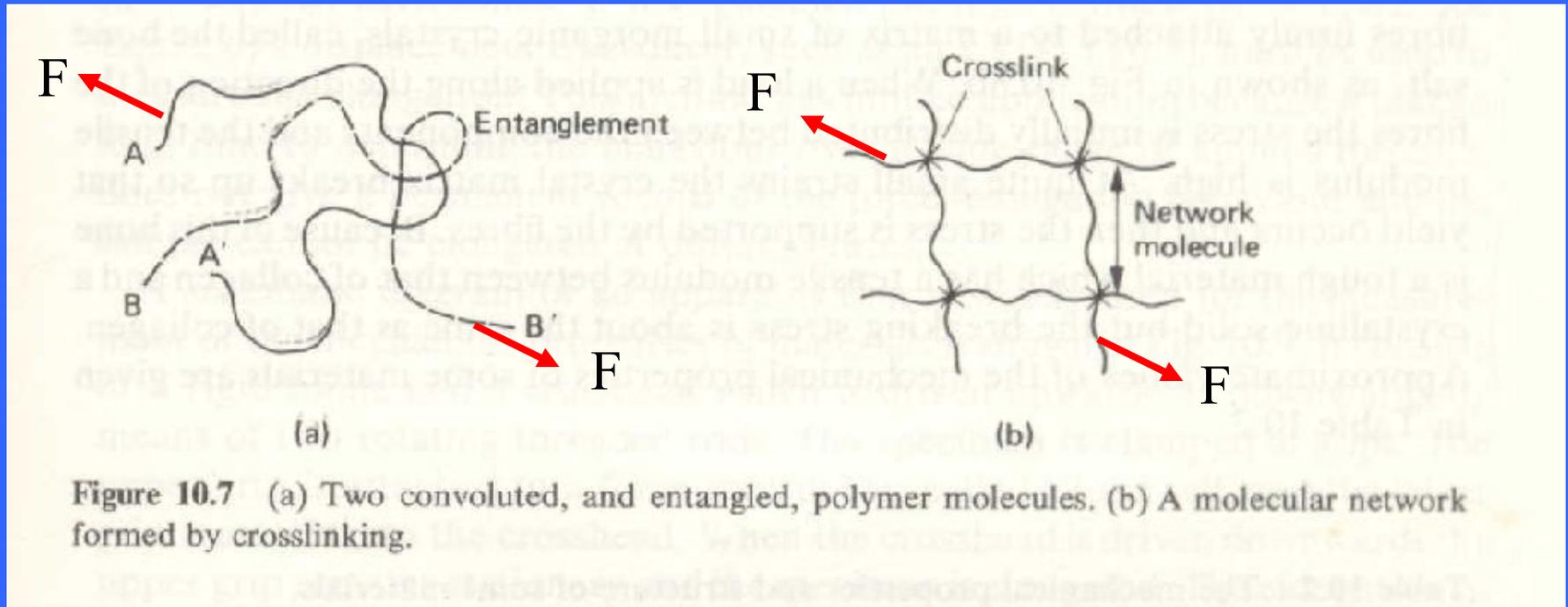


Figure 10.6 (a) A small segment of a polymer molecule with a carbon backbone chain. (b) The elongation of a segment by bond rotation due to a force F_x .

Molte strutture biologiche sono dei polimeri di elevato peso molecolare in cui l'angolo di legame CX_2-CX_2 (a) può essere deformato dalla applicazione di forze esterne. L'applicazione di forze può produrre una deformazione anche grazie alla rotazione dei singoli atomi di carbonio senza variare l'angolo di legame (b).

I materiali biologici sono formati da un consistente numero di molecole polimerizzate aggrovigliate (a) e legate (b) tra di loro



L'applicazione di F può provocare un continuo allungamento della struttura per scivolamento di un polimero sugli altri (a), oppure l'allungamento è limitato a causa di legami incrociati tra i polimeri (b)

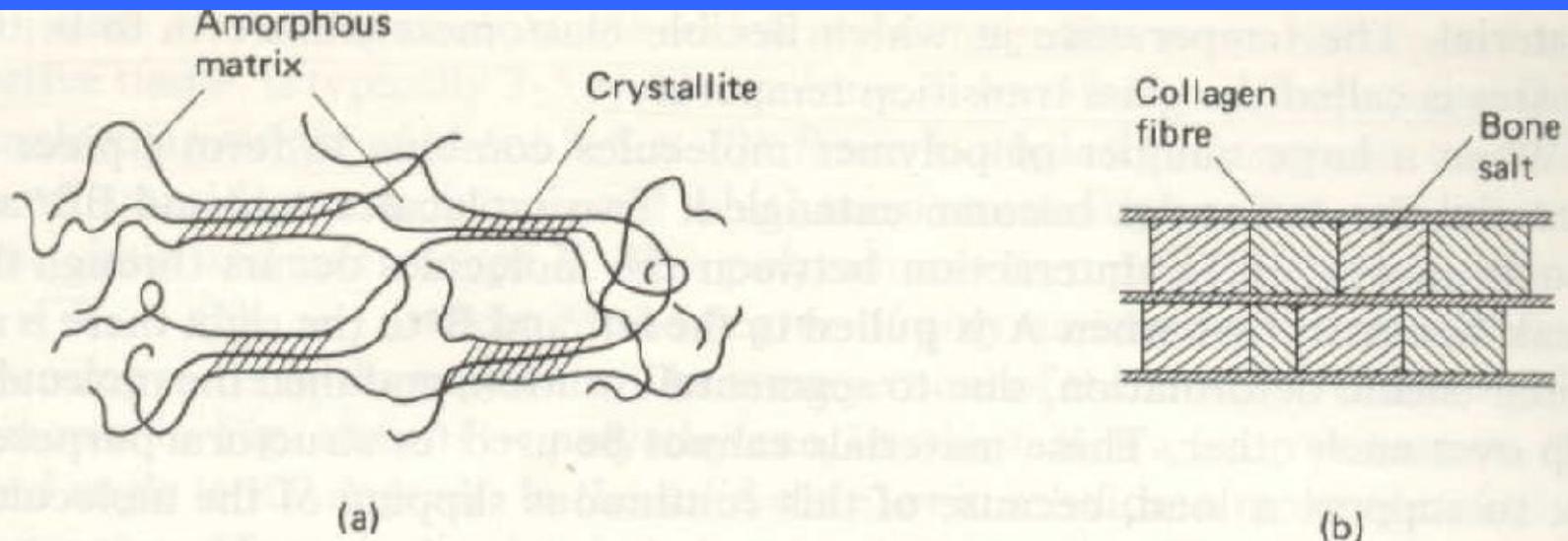
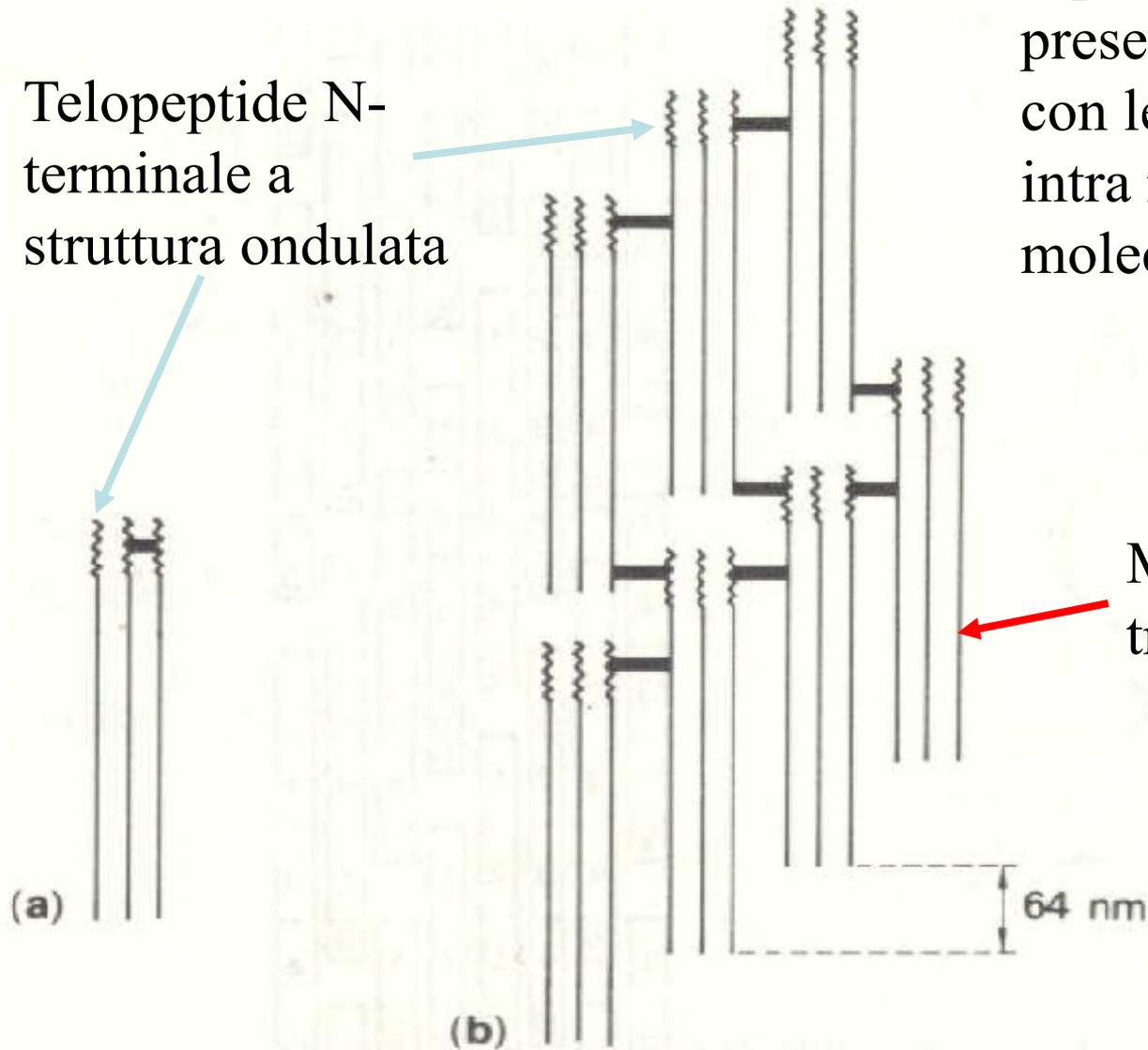


Figure 10.8 (a) A semi-crystalline polymer. (b) A composite material (bone).

Molti tessuti biologici sono duttili e presentano una media rigidità (collagene, cheratina) grazie alla presenza di cristalliti. I cristalliti sono zone di cristallizzazione attorno ad una matrice amorfa (a) che determinano il grado di rigidità del materiale biologico. Se la quantità di cristalliti è notevole si ha un corrispondente aumento della rigidità del tessuto connettivo con il caso limite dell'osso (b)

Telopeptide N-terminale a struttura ondulata



Tipica struttura tendinea che presenta le fibre di collagene con legami tipo cristallite intra molecolari (a) ed extra molecolari (b)

Molecole lineari di tropocollagene

Fig. 3.15 (a) Intra- and (b) intermolecular crosslinks in collagen. Straight lines represent polypeptide chains in the helical region of tropocollagen molecules; wavy lines represent the *N*-terminal telopeptide (BAILEY *et al.*, 1970a).

Curva tensione-lunghezza del tendine

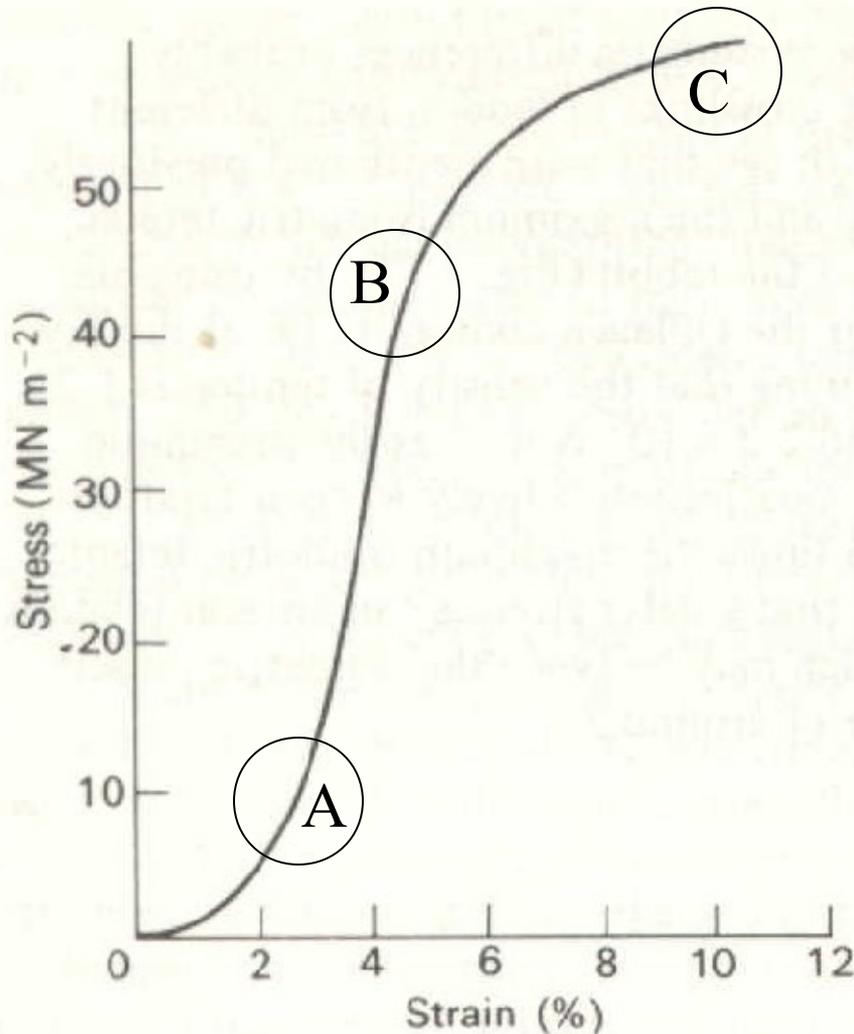
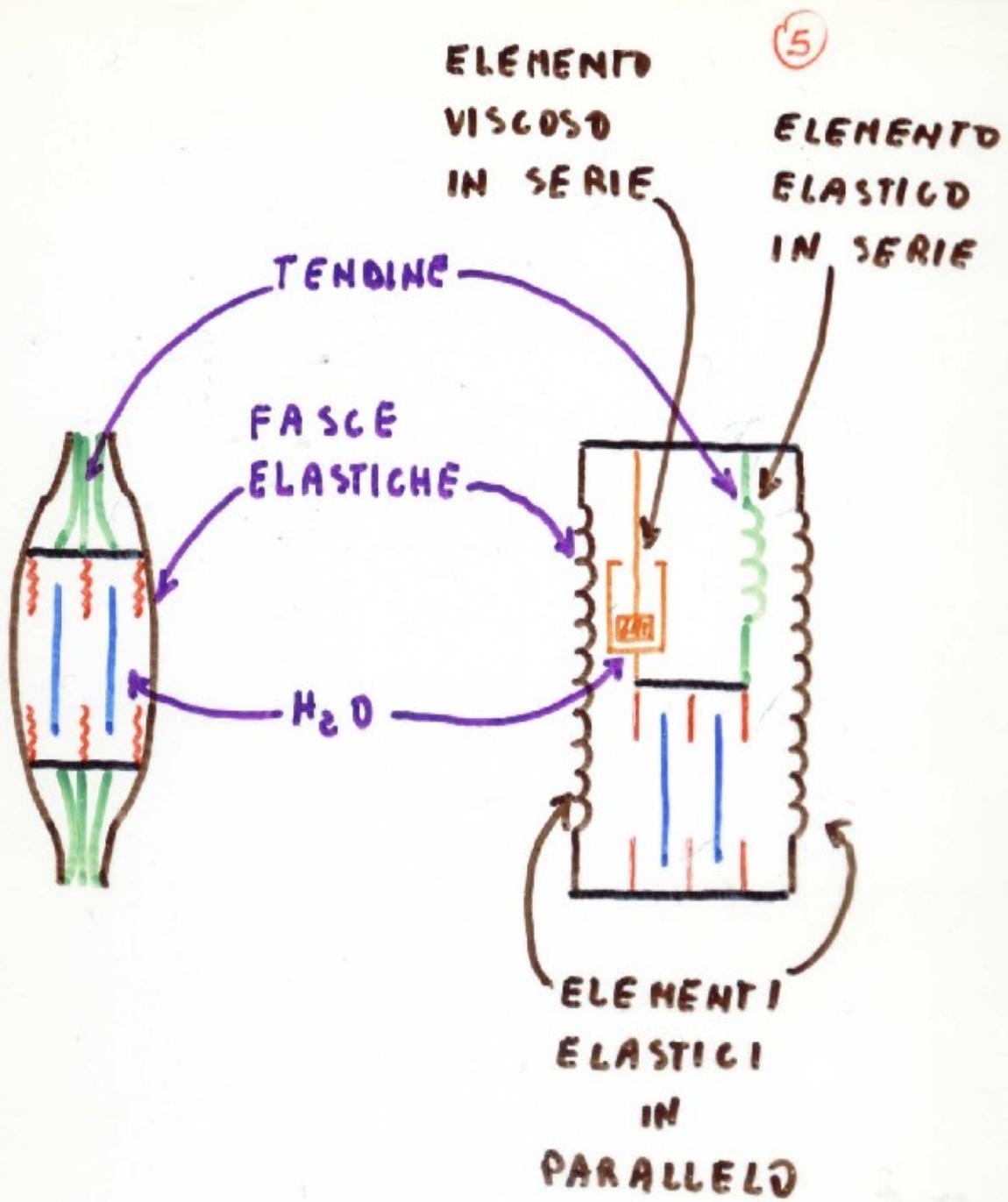


Fig. 3.18 A typical stress-strain curve for tendon.

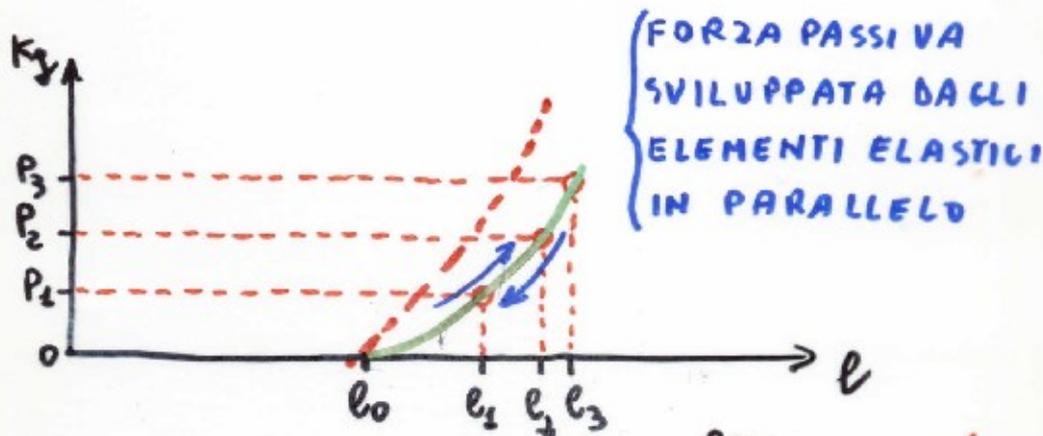
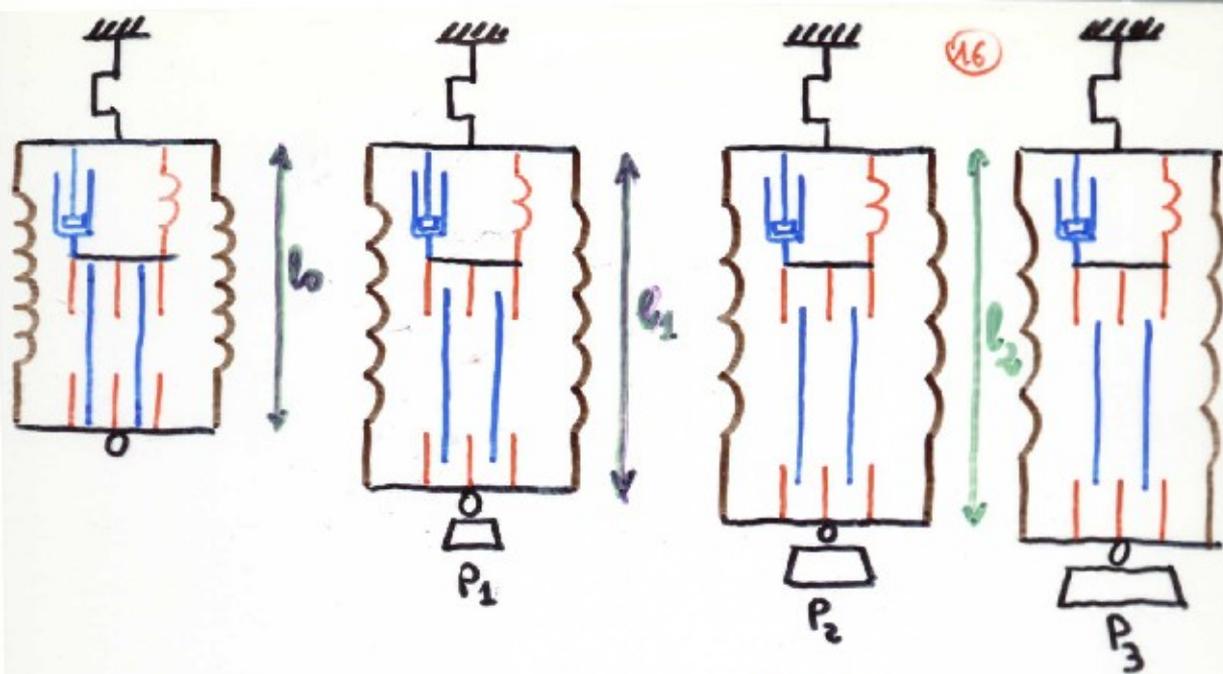
Il tendine è composto da strutture ondulate che, durante la trazione, si srotolano e diventano parallele (tratto 0-A della curva), poi la forza viene applicata direttamente alle fibre rettilinee che presentano un più elevata rigidità (tratto A-B della curva). La massima distensibilità del tendine è di circa 3%. Allungamenti ulteriori possono portare alla rottura (tratto B-C)

**LA RELAZIONE TENSIONE-
LUNGHEZZA NELLA FIBRA
MUSCOLARE STRIATA**



IL MODELLO MECCANICO DEL MUSCOLO

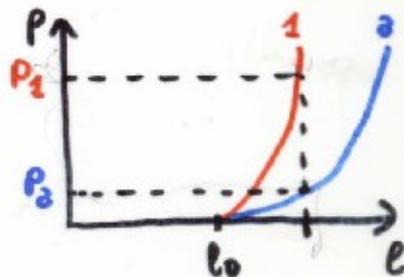
Il muscolo è una struttura deformabile che, sotto il profilo meccanico, può essere rappresentata da elementi elastici connessi in parallelo (fasce endoteliali) ed in serie (tessuto connettivo-elastico dei tendini) al sistema contratile, e da un elemento viscoso (fluidi intrinseci al muscolo) connesso in serie allo stesso sistema contratile.



FORZA PASSIVA SVILUPPATA DALLI ELEMENTI ELASTICI IN PARALLELO

$$P_3 = 3P_1 \quad P_2 = 2P_1$$

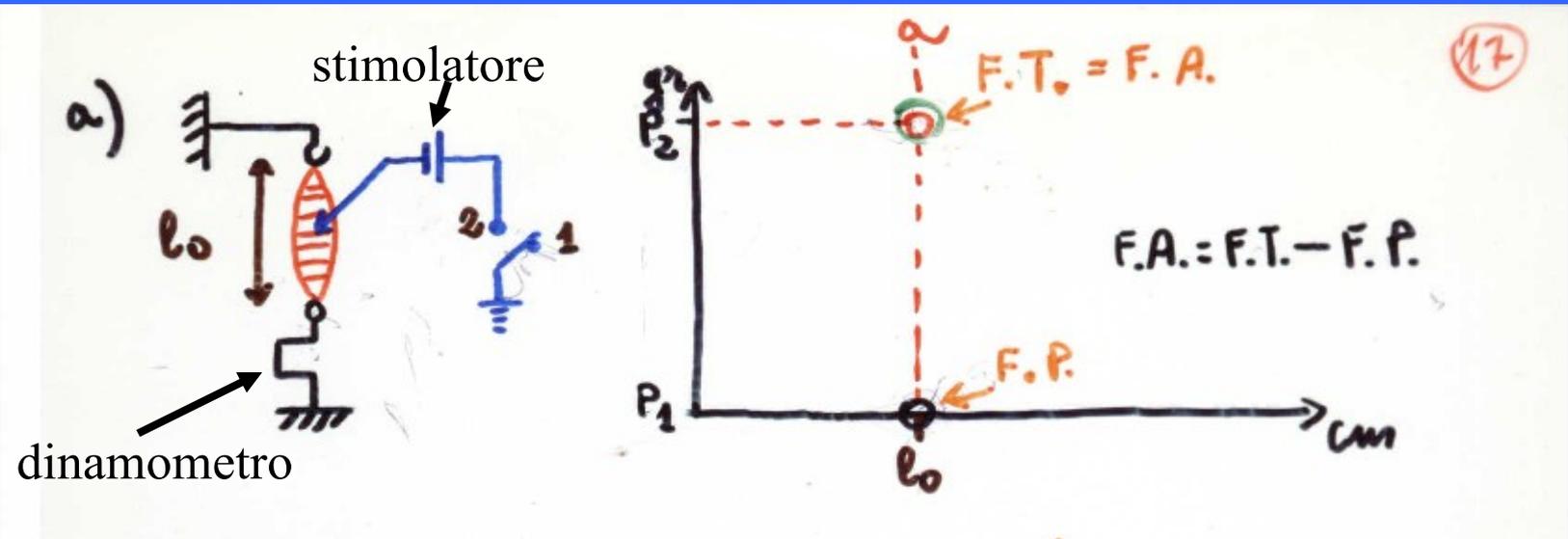
$$(l_1 - l_0) > (l_2 - l_1) > (l_3 - l_2)$$



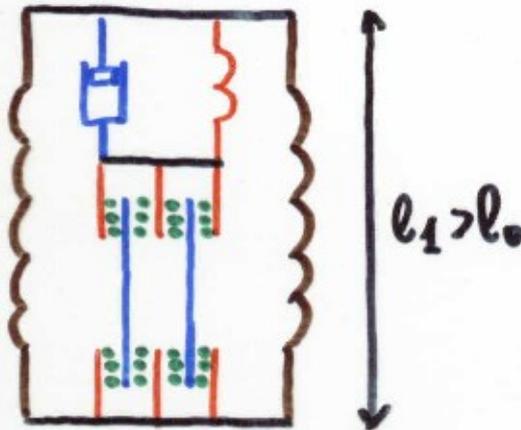
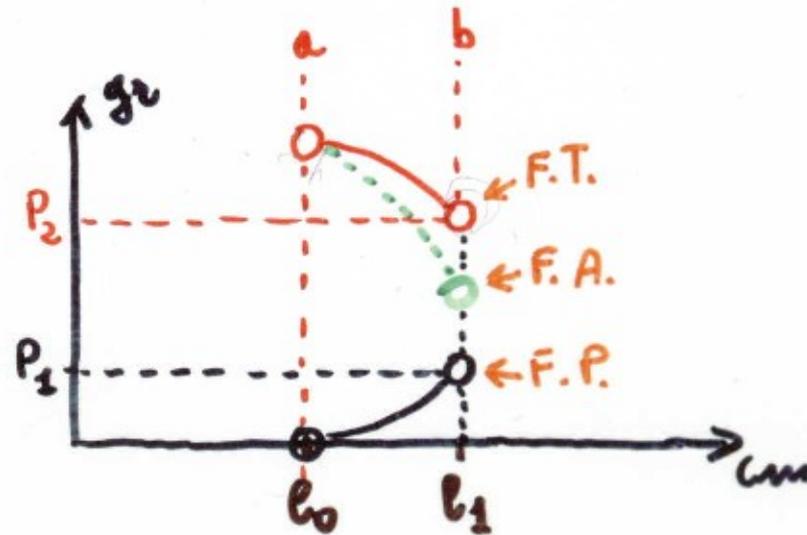
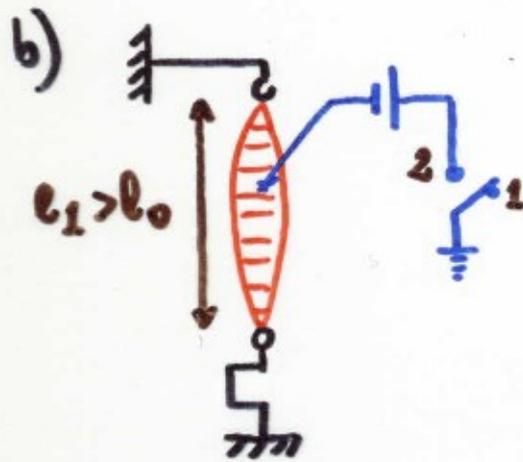
Muscolo rilasciato e sollecitato meccanicamente a trazione tramite una forza peso crescente.

la deformazione subita dal muscolo è in campo elastico e la caratteristica P-L è rappresentata da una curva la cui pendenza è funzione della rigidità delle resistenze elastiche in parallelo

Risposta in tensione alla stimolazione sopramassimale (tetanica) di un muscolo ex-vivo vincolato alle estremità e quindi con lunghezza di riposo L_0 costante (contrazione isometrica)



Risposta in tensione alla stimolazione sopramassimale (tetanica) di un muscolo ex-vivo vincolato alle estremità e quindi con lunghezza di riposo $L_1 > L_0$ costante (contrazione isometrica)

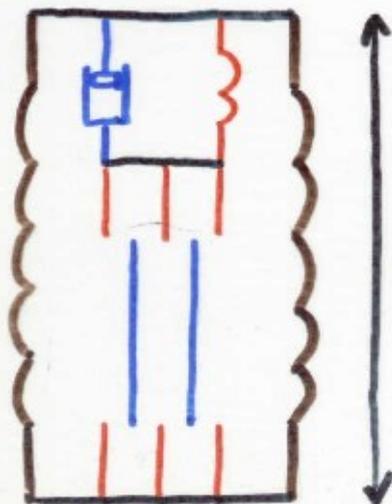
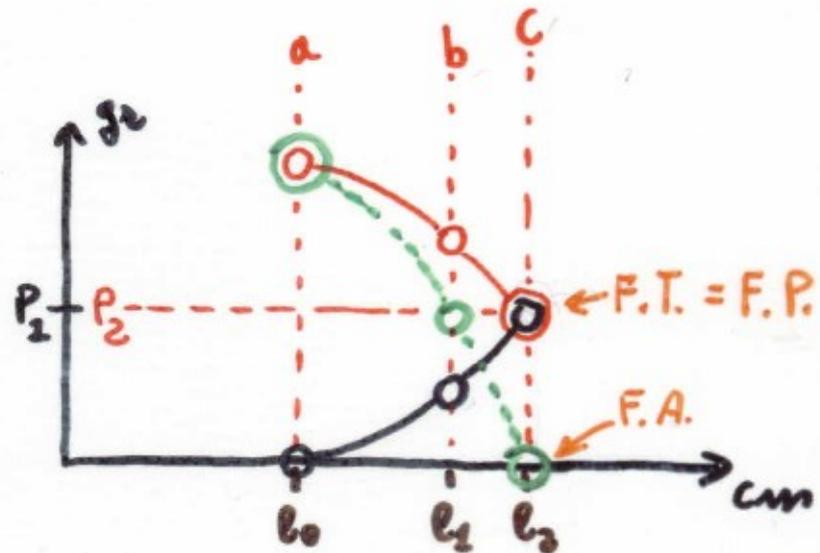
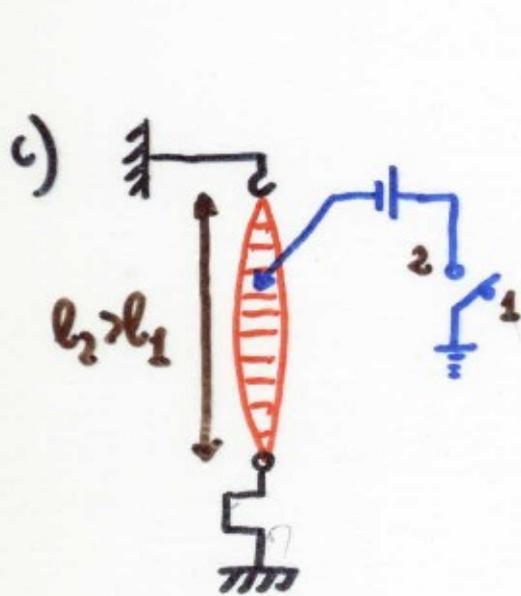


$$F.A. < MAX$$

$$F.P. > 0$$

$$F.A. < F.T. > F.P.$$

$$L1 < L2 = L_{max}$$

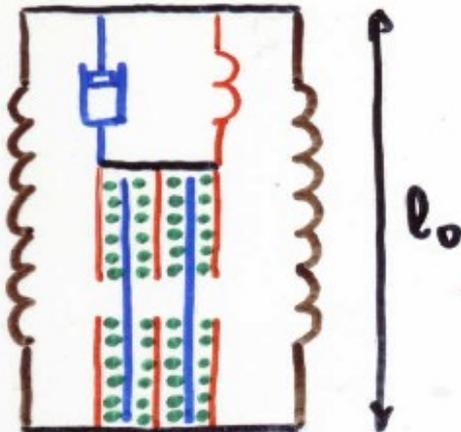
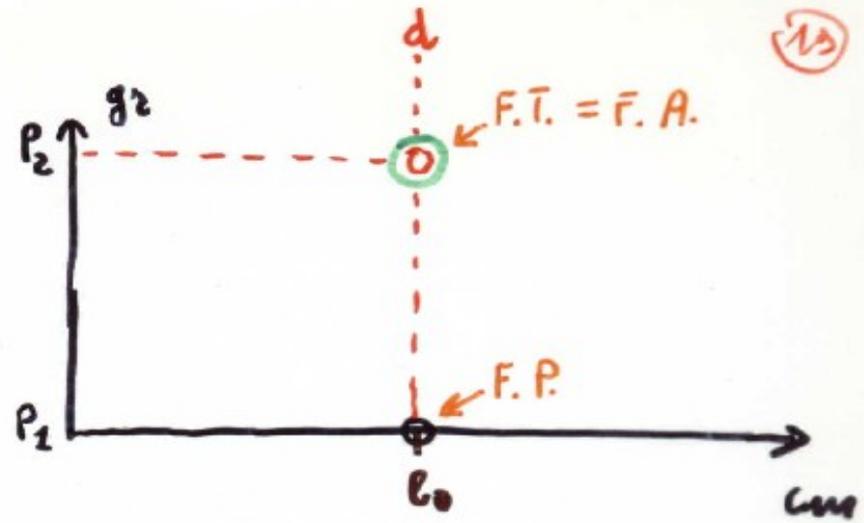
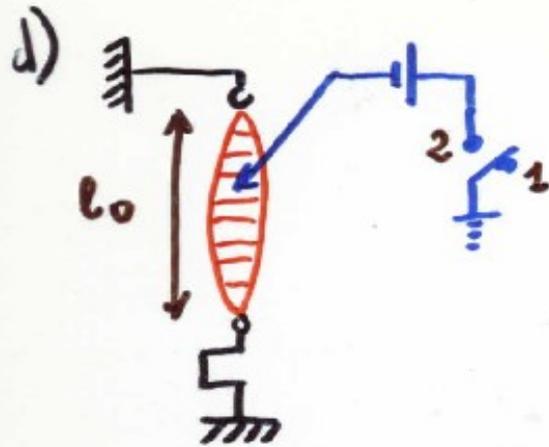


$$F.A. = 0$$

$$F.P. = MAX$$

$$F.T. = F.P.$$

Risposta in tensione alla stimolazione sopramassimale (tetanica) di un muscolo ex-vivo vincolato alle estremità e quindi con lunghezza di riposo L_0 costante (contrazione isometrica)

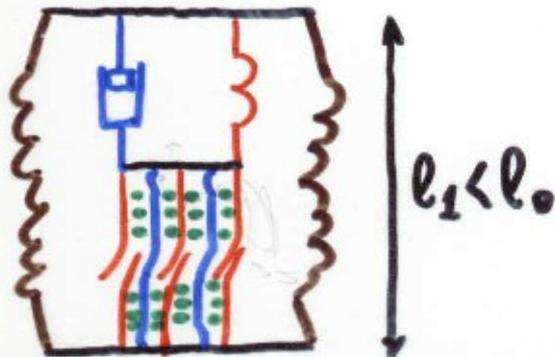
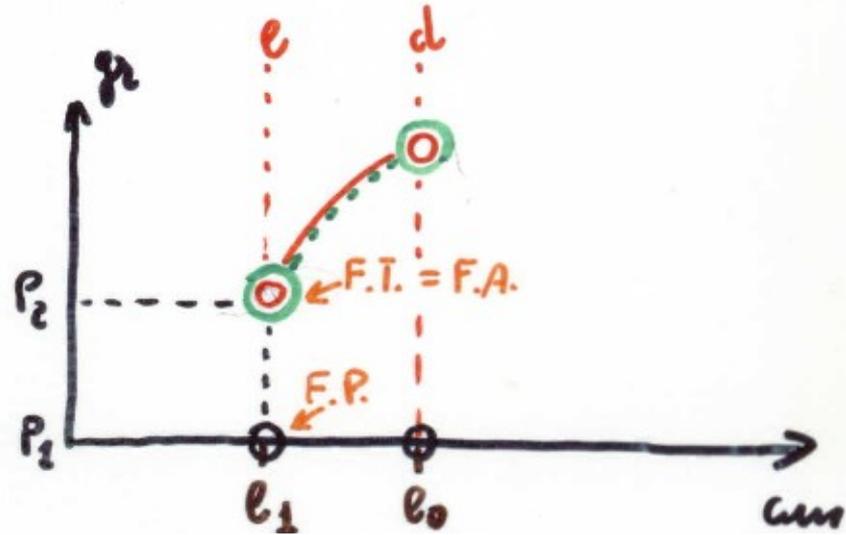
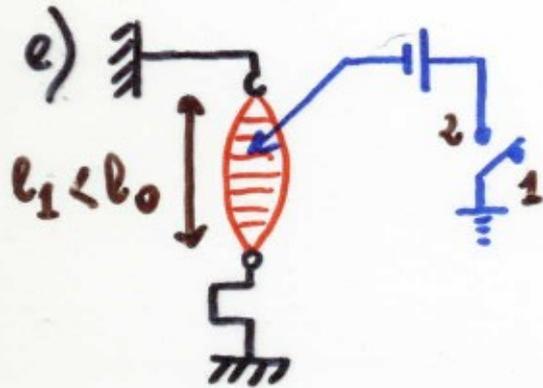


$$F.A. = \text{MAX}$$

$$F.P. = 0$$

$$F.T. = F.A.$$

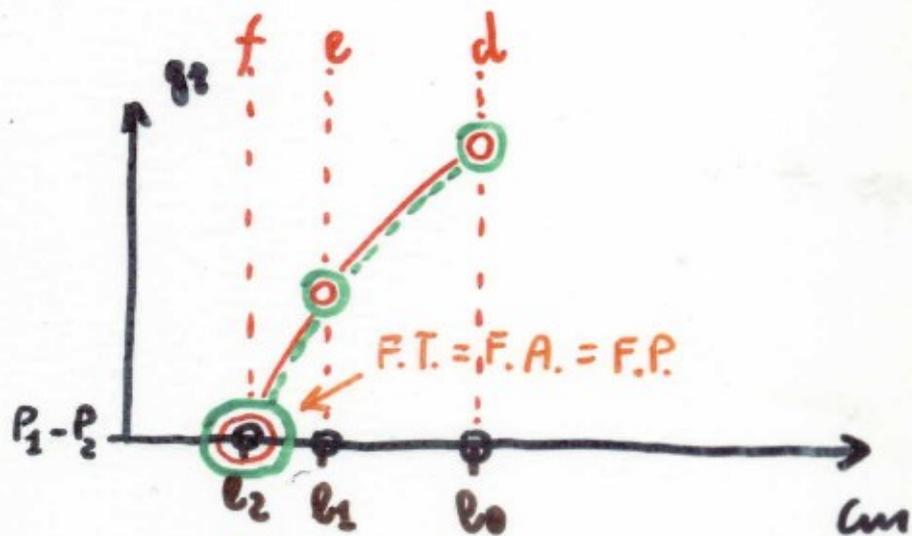
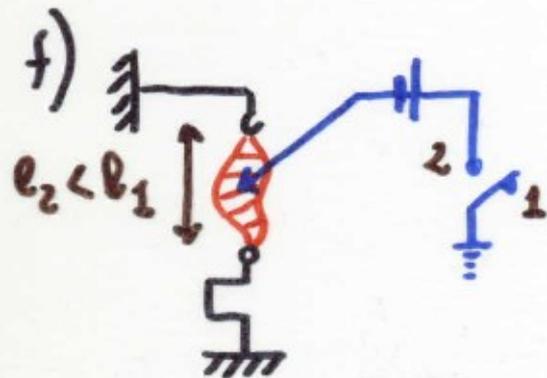
Risposta in tensione alla stimolazione sopramassimale (tetanica) di un muscolo ex-vivo vincolato alle estremità e quindi con lunghezza di riposo $L_1 < L_0$ costante (contrazione isometrica)



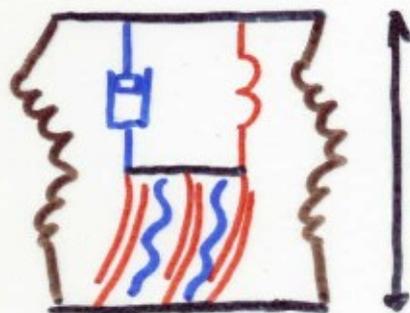
$$F.A. < MAX$$

$$F.P. = 0$$

$$F.T. = F.A.$$



$[l_2 = 2/3 l_0]$



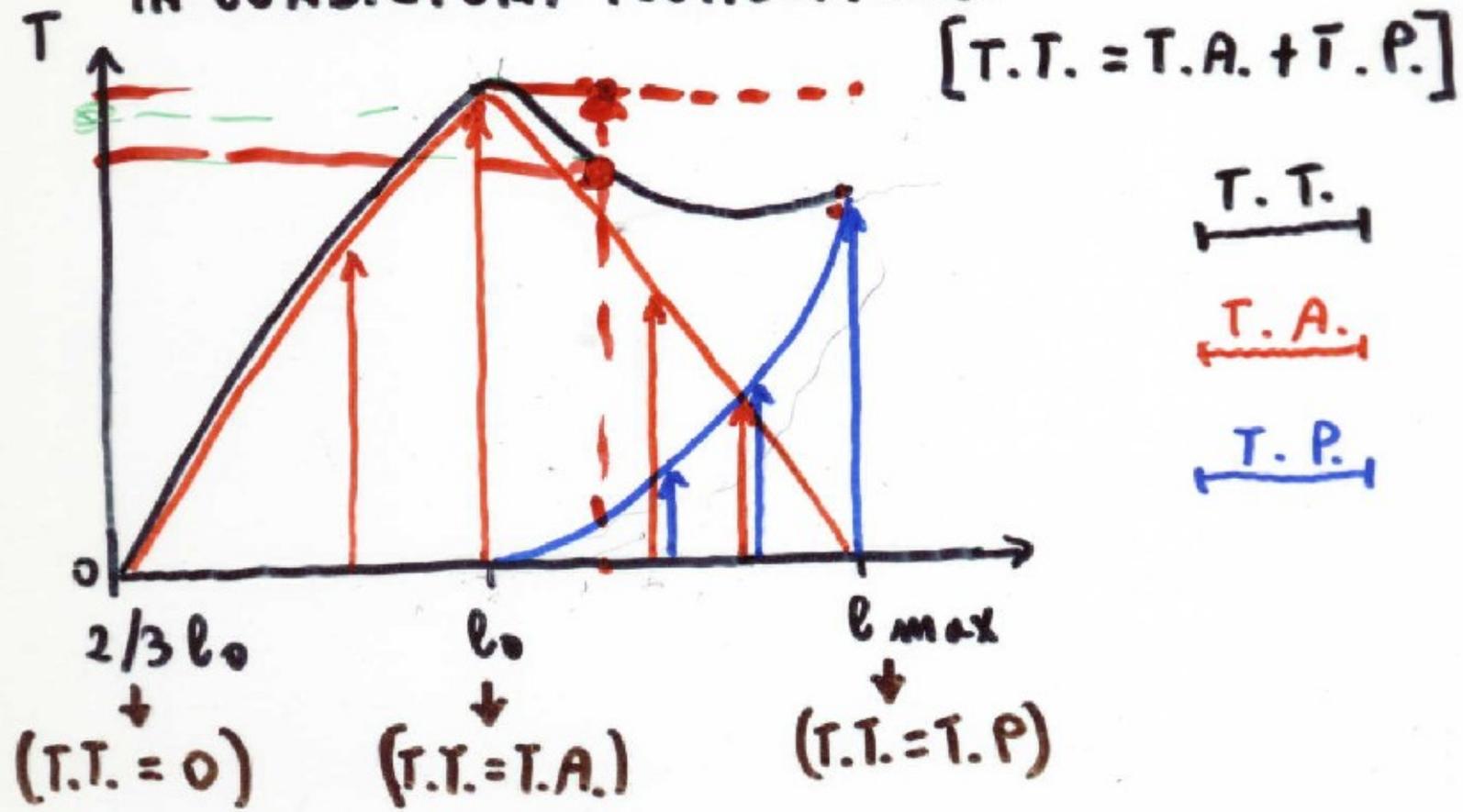
$F.A. = 0$

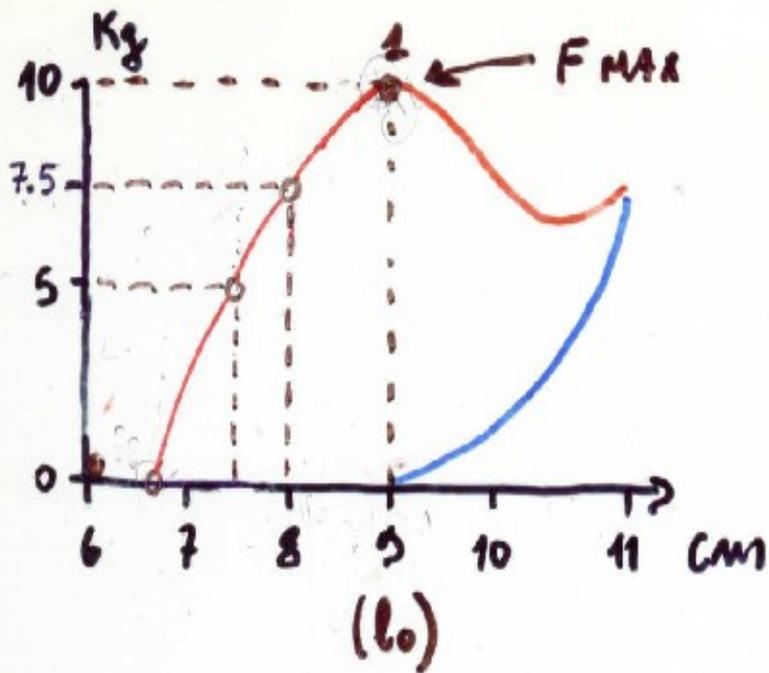
$F.P. = 0$

$F.T. = 0$

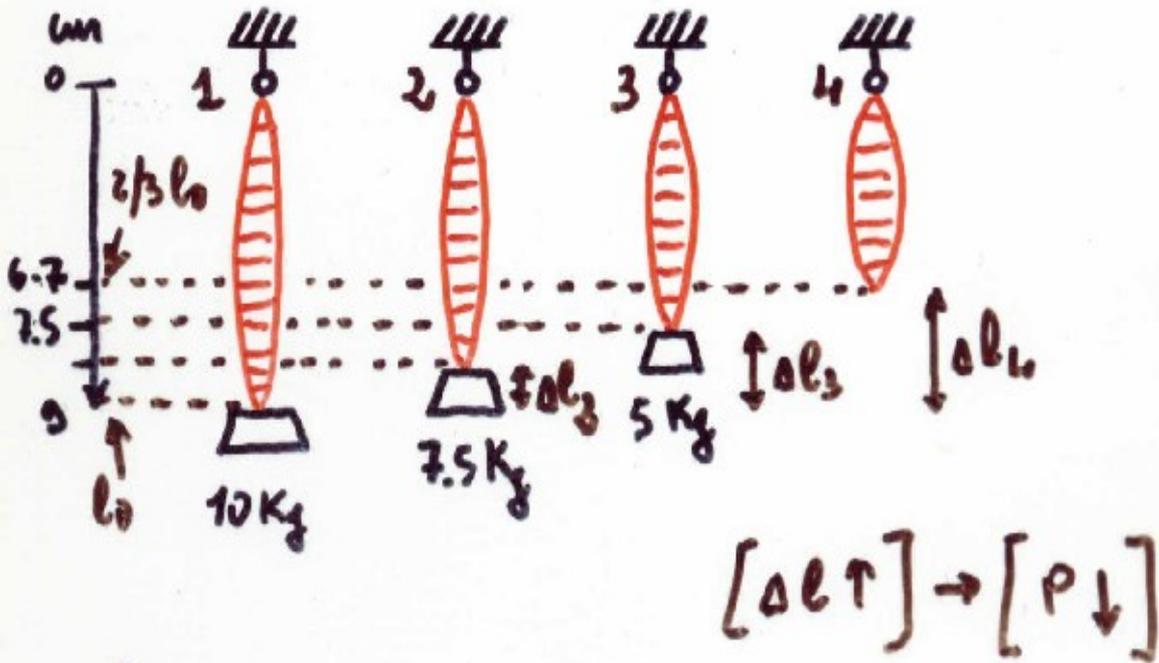
$[l = 3/3 l_0] \rightarrow [F.A. = 0]$

DIAGRAMMA LUNGHEZZA-TENSIONE DEL MUSCOLO STRIATO STIMOLATO TETANICAMENTE. IN CONDIZIONI ISOMETRICHE.

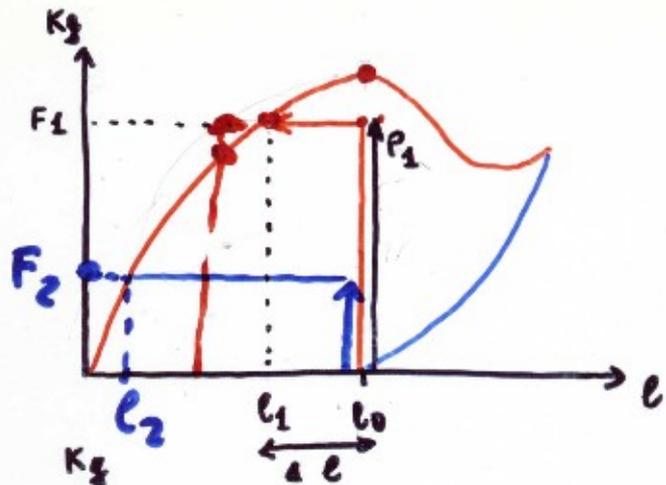




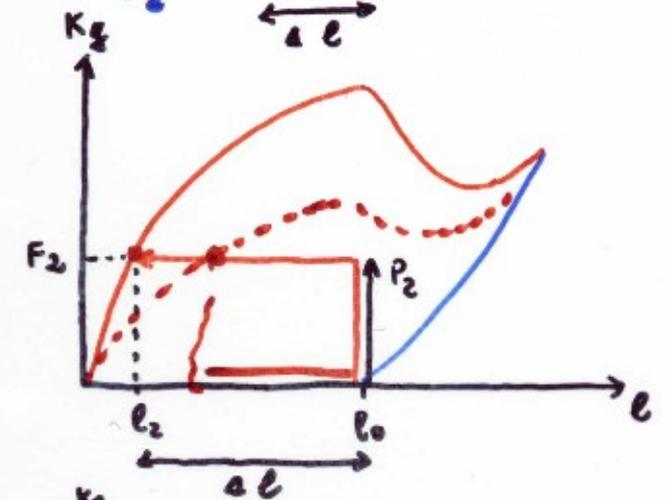
L'entità dell'accorciamento muscolare conseguente alla contrazione è tanto più consistente quanto più il carico (P) applicato si discosta dalla massima forza attiva (F_{max}) sviluppabile dal muscolo.



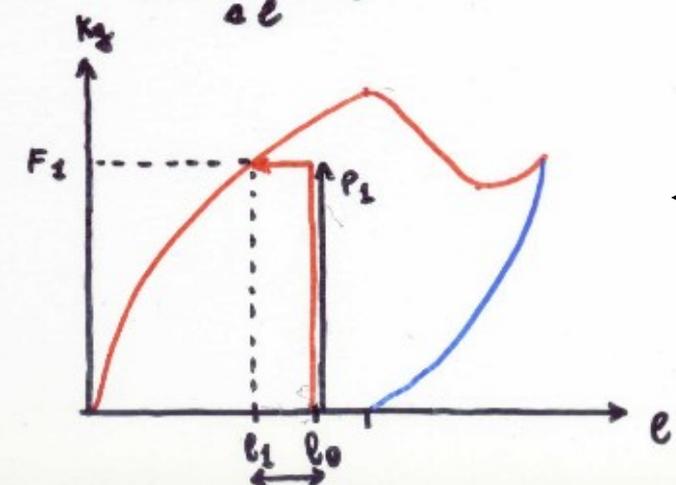
Quindi per $P = F_{\text{max}}$ la contrazione è isometrica, per $P = 0$ l'accorciamento è massimo, per $P > F_{\text{max}}$ si ha allungamento o contrazione eccentrica.



La contrazione di un muscolo rimane isometrica fino a quando la forza attiva sviluppata non supera il carico applicato

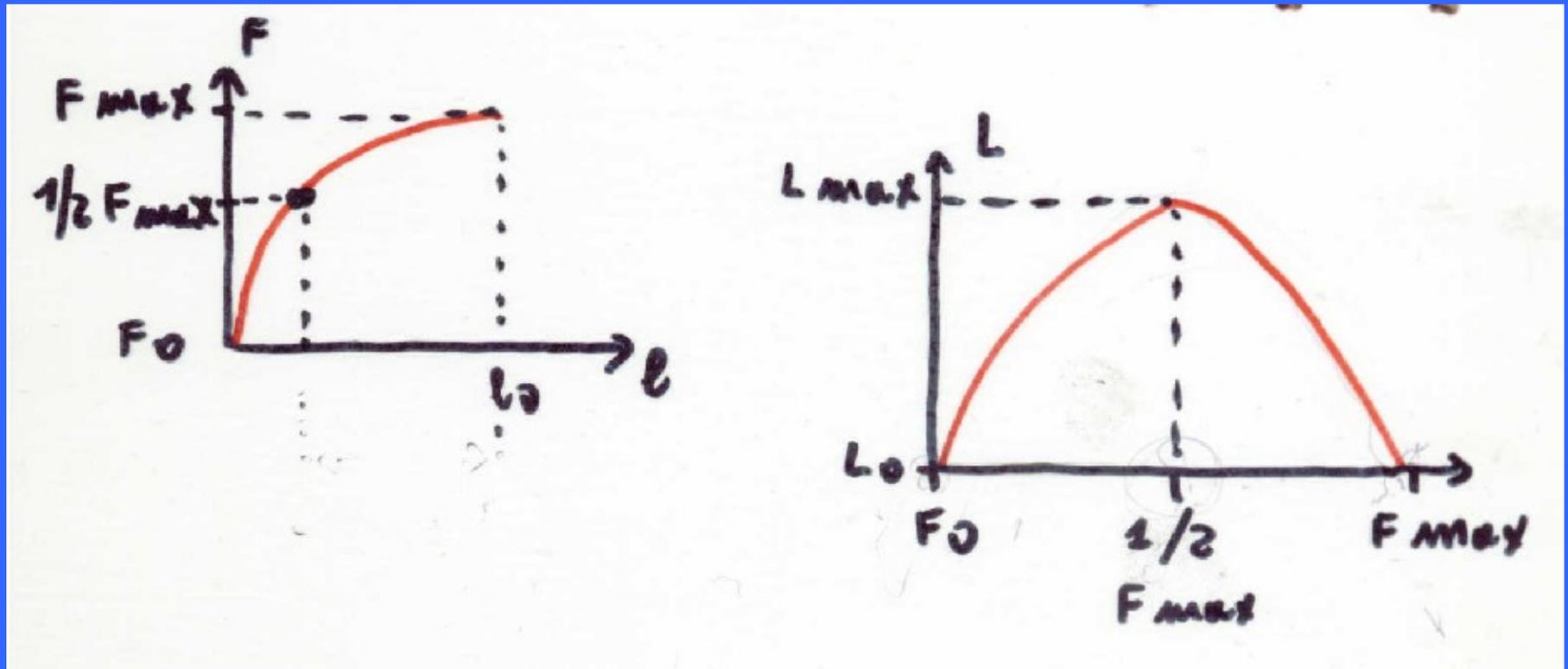


A parità di carico applicato l'accorciamento sarà tanto più consistente quanto più è elevata la F_{max}

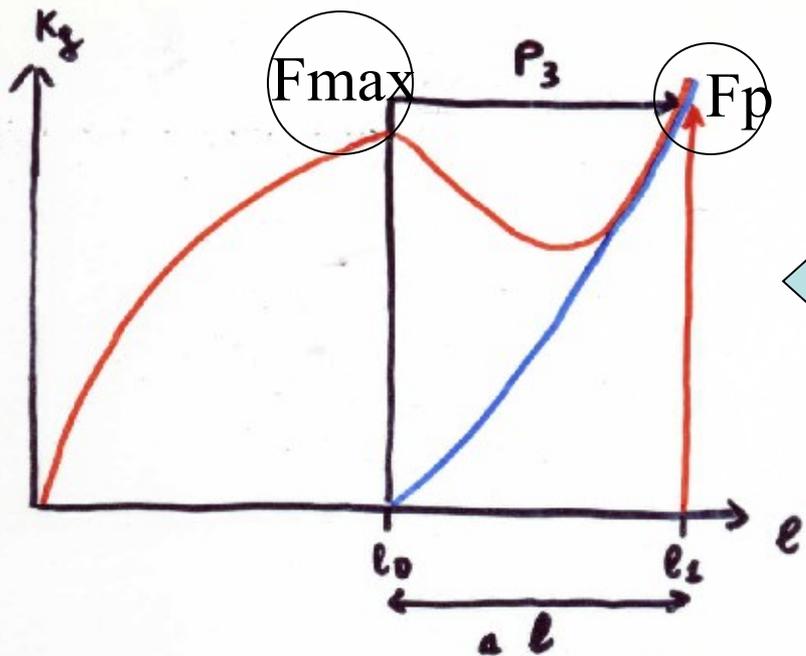


A parità di carico applicato l'accorciamento sarà tanto più limitato quanto più la lunghezza di riposo sarà minore di L_0

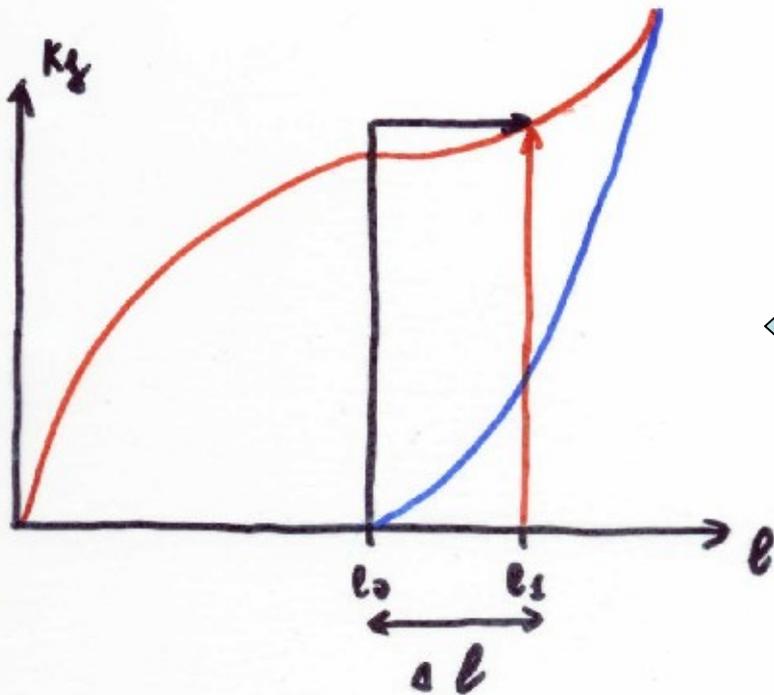
Dipendenza del lavoro meccanico dalla frazione della F_{max} utilizzata



Il massimo lavoro meccanico si sviluppa quando $F = 1/2 F_{max}$



Se il carico applicato alla lunghezza L_0 è superiore a F_{max} si ha uno stiramento del muscolo che si allunga fino ad incontrare nuovamente la caratteristica T-L (f_p).



Se il tendine è sufficientemente rigido allora il tratto $F_{max}-F_p$ è parallelo all'asse delle ascisse e quindi incrementi di lunghezza oltre la L_0 possono essere sostenuti senza lo scivolamento verso F_p

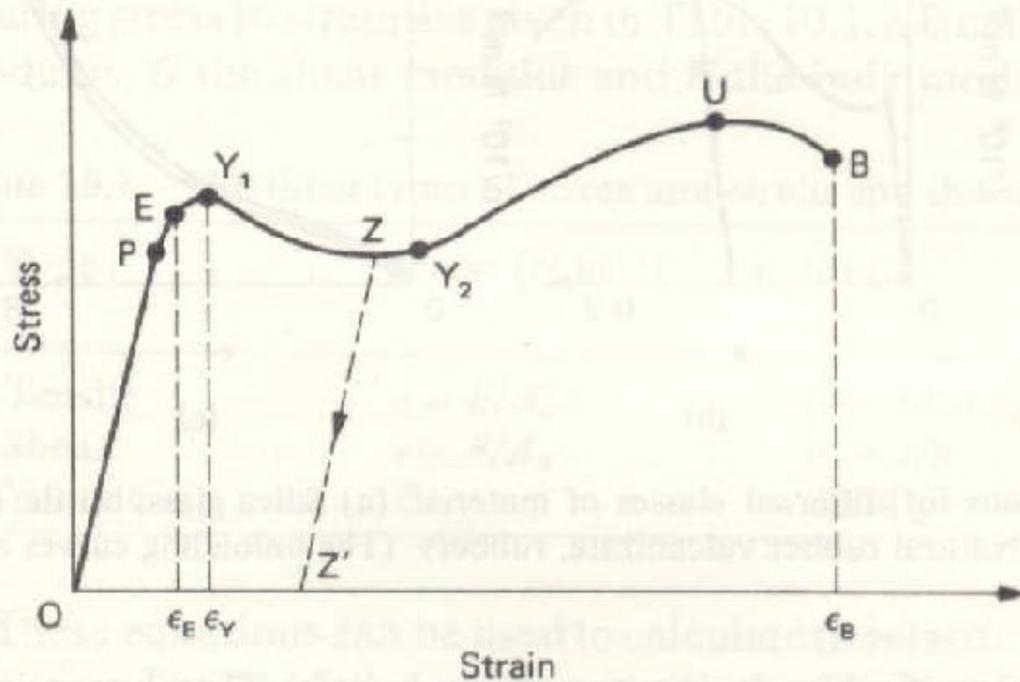


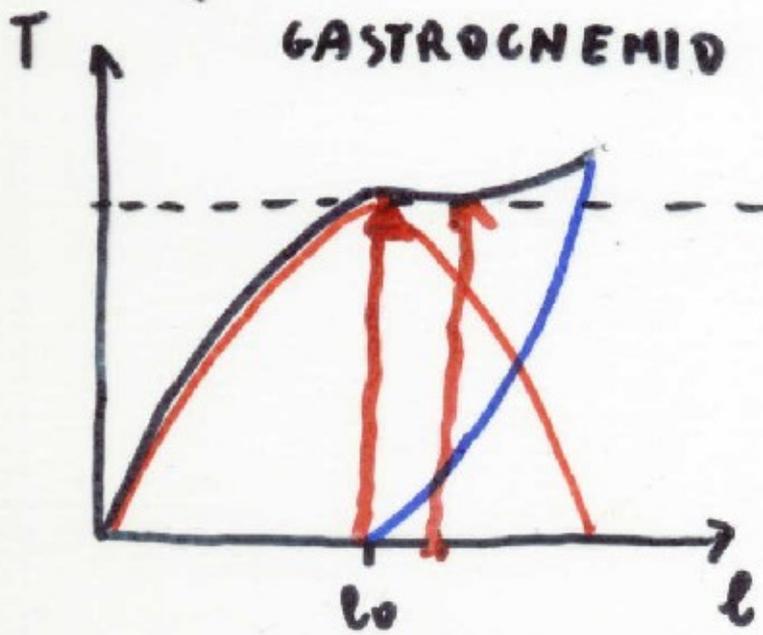
Figure 10.2 A generalized stress–strain diagram. P, proportional limit; E, elastic limit; Y_1 , upper yield point; Y_2 , lower yield point; B, break.

Curva stress (σ) – strain (ϵ) di un provino di materiale solido sottoposto a sforzo di trazione

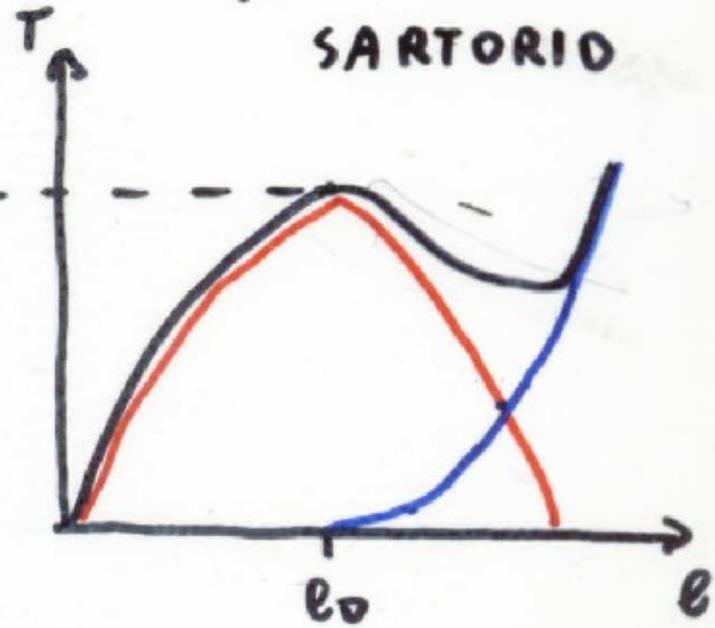
OP: deformazione elastica – E: limite di elasticità – Y_1Y_2 : intervallo di duttilità – ZZ': recupero post deformazione – B: limite di rottura

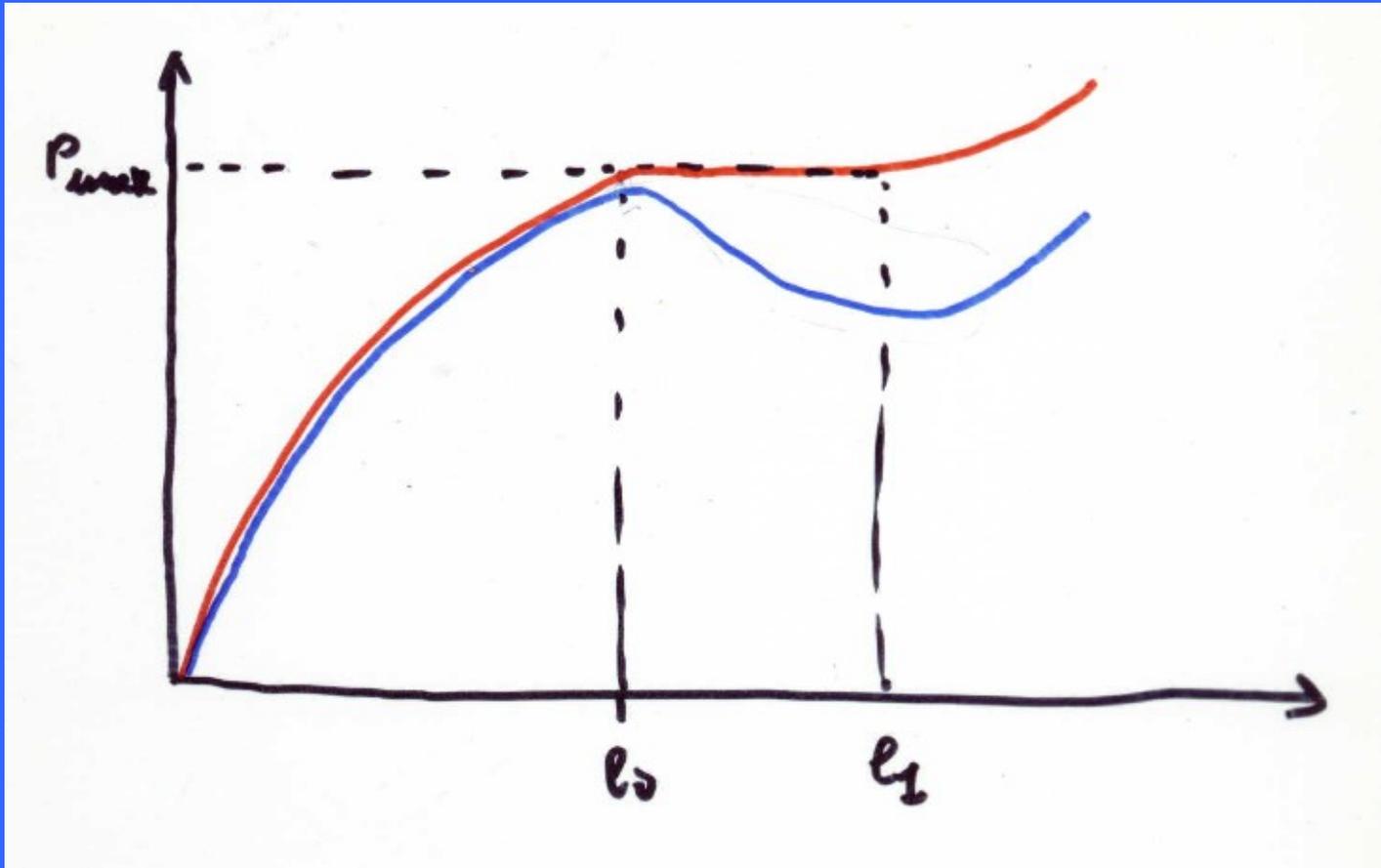


GASTROCNEMID

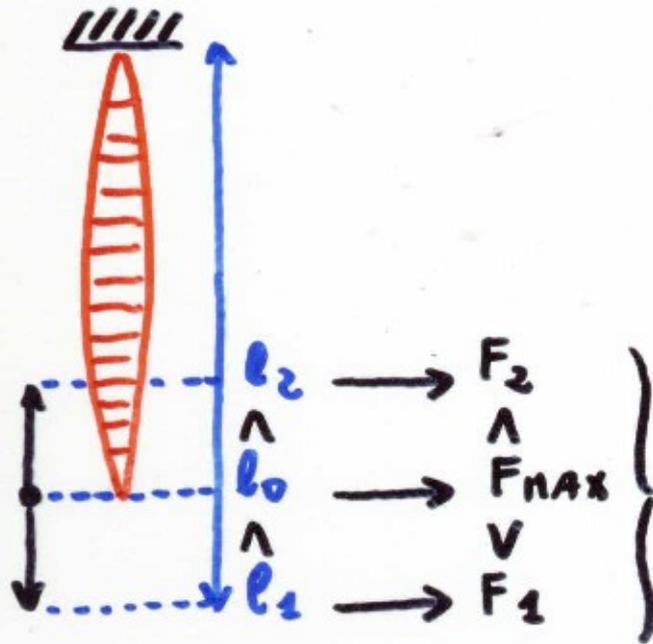


SARTORIUS



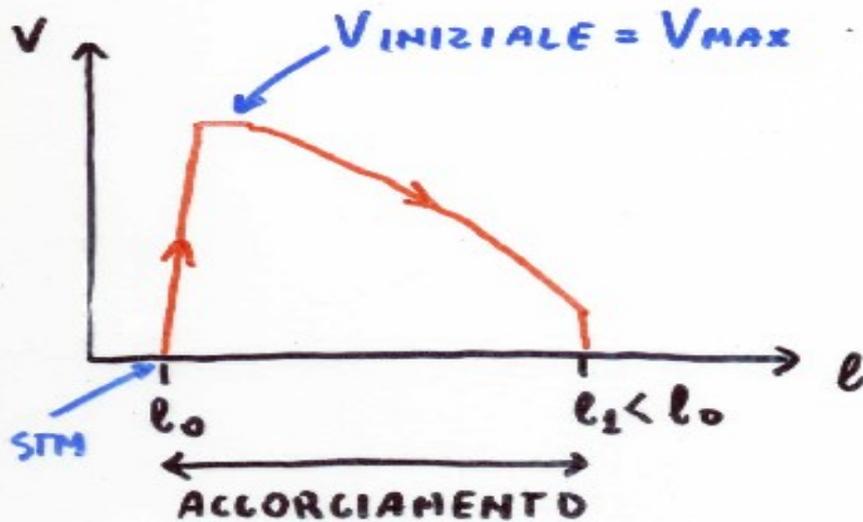


LE PROPRIETÀ DINAMICHE DEL MUSCOLO



La velocità di
 contrazione
 muscolare è
 funzione istantanea
 della forza attiva

[$V_{CONTRAZIONE} \propto F_{MUSCOLARE}$]



MUSCOLO: $F_{\text{SVILUPPATA}} \propto \frac{1}{\text{ACCORCIAMENTO}}$

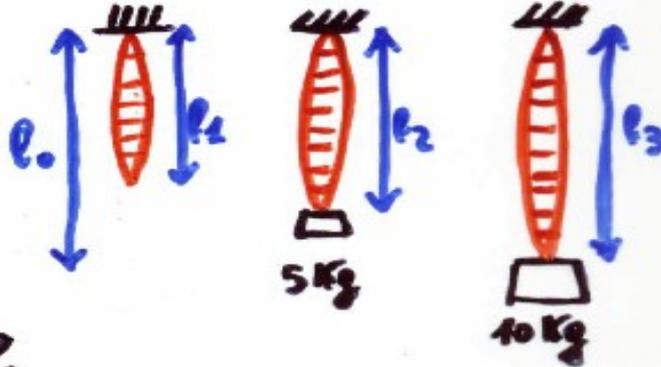
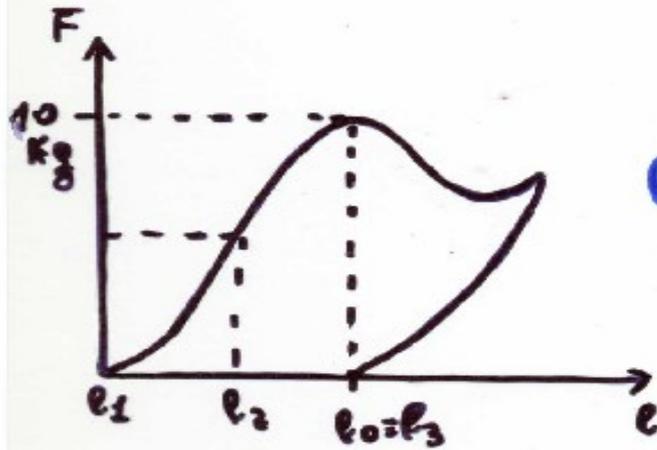
$$V \propto \frac{1}{\text{ACCORCIAMENTO}}$$

$$[V_{\text{MAX}} = V_{\text{INIZIALE}}]$$

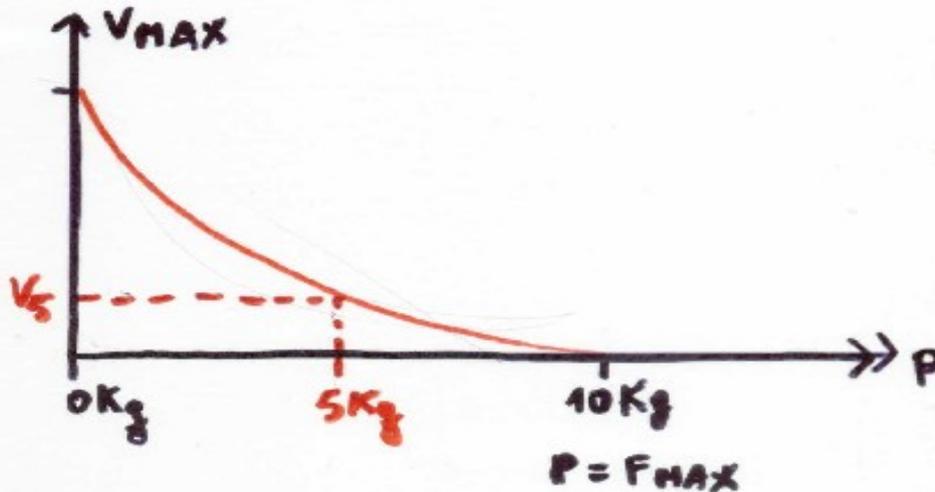
La massima velocità di accorciamento muscolare si osserva all'inizio della contrazione.

Successivamente, a causa della progressiva riduzione nella sovrapposizione dei filamenti di actina e miosina, la forza si riduce e quindi la velocità di accorciamento diminuisce.

$$\left[V_{MAX} \propto \frac{1}{P} \right]$$



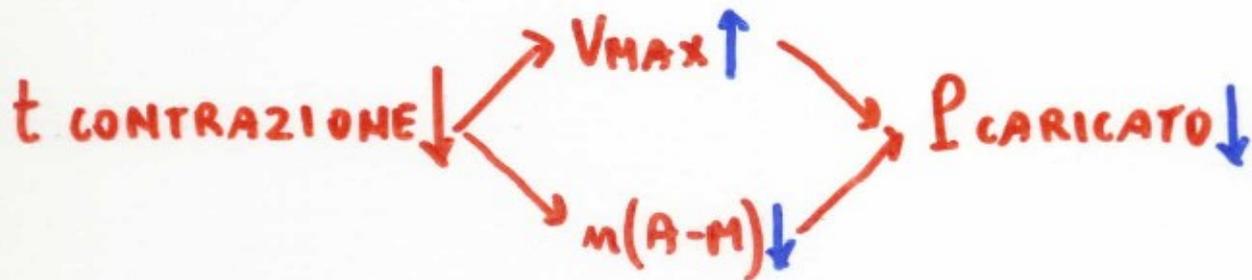
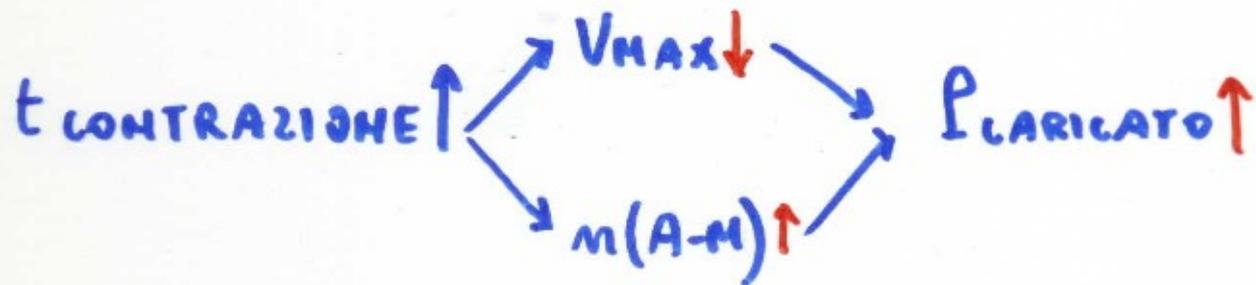
$$V_{MAX} \propto \frac{F_{MAX} - P}{P} \quad [\text{IPERBOLE}]$$

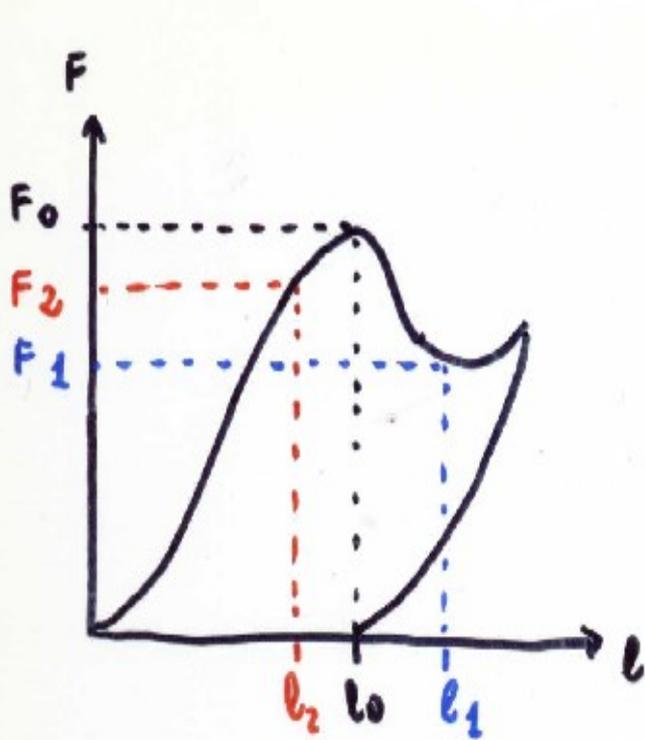


La funzione matematica che meglio caratterizza la relazione tra forza prodotta (questa in condizioni isotoniche è sempre uguale al carico spostato) e velocità di accorciamento è un ramo di iperbole equilatera, per cui le massime velocità iniziali si hanno con i minimi carichi e viceversa.

F CONTRAZIONE \rightarrow $n(A-M)$

$t(A-M) = \text{cost.}$

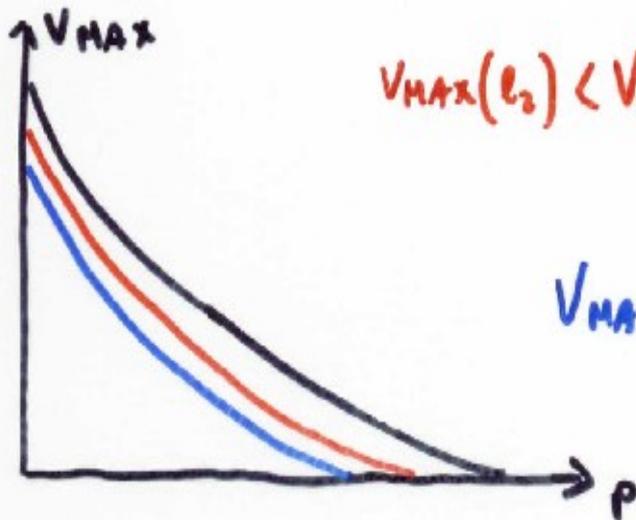




$$[V \propto F]$$

$$l_2 < l_0 < l_1$$

$$F_2 < F_0 > F_1$$

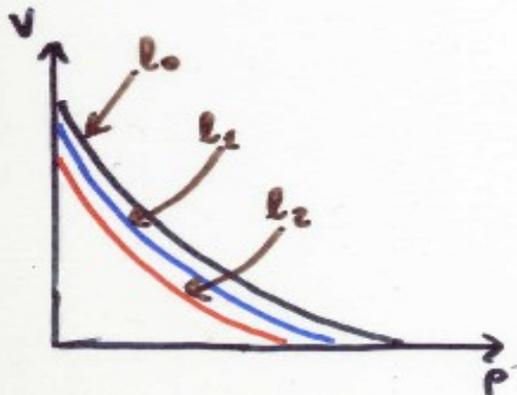
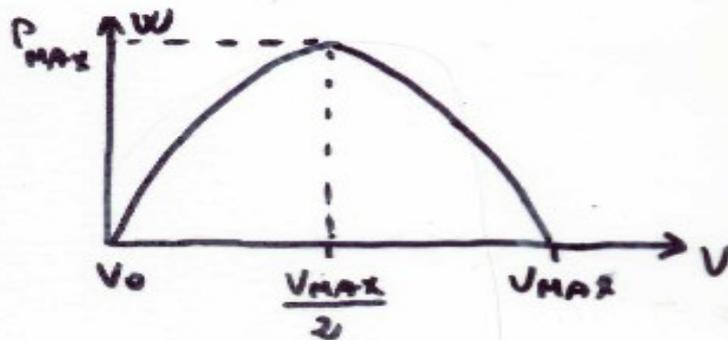
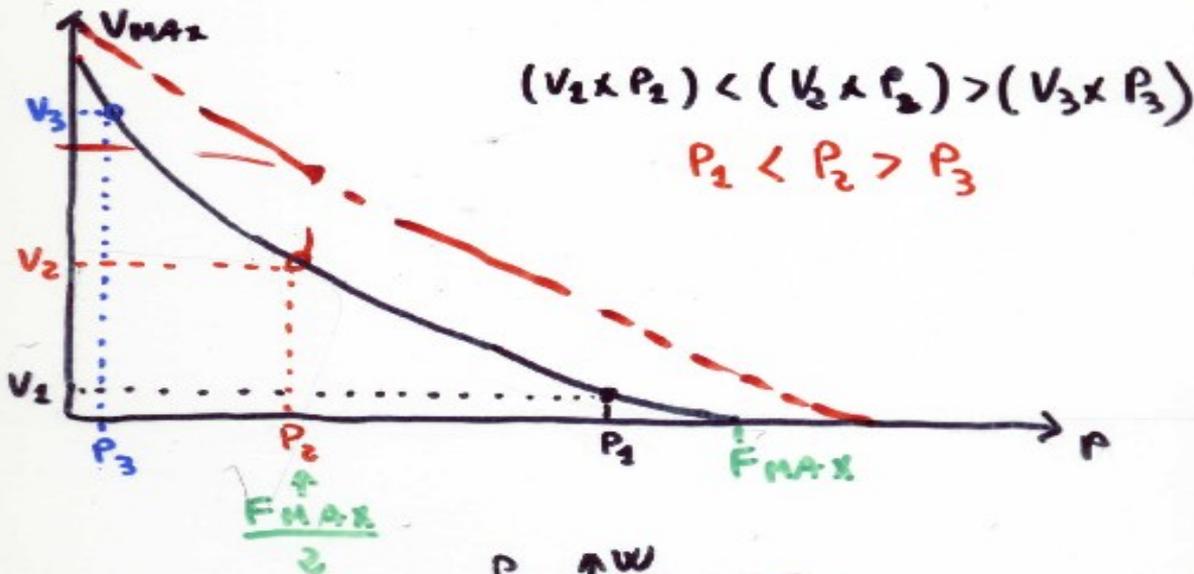


$$V_{MAX}(l_2) < V_{MAX}(l_0) > V_{MAX}(l_1)$$

$$V_{MAX} = f(P); f(l_0)$$

Il massimo valore in assoluto della velocità iniziale di accorciamento muscolare si ha quando la lunghezza ai cui si trova il muscolo prima della contrazione è pari a L_0 . Per lunghezze muscolari di riposo maggiori o minori di L_0 la caratteristica F-V presenta valori minori.

$$POTENZA(P) = \frac{L}{t} = \frac{F \times l}{t} = F \times V$$



$$[l_2 > l_0 > l_1]$$

$$\downarrow$$

$$P(l_2) < P(l_0) > P(l_1)$$

La massima potenza meccanica (W_{max}) della contrazione muscolare si ha in corrispondenza della velocità pari a $\frac{1}{2} V_{max}$.

Partendo da lunghezze del muscolo a riposo maggiori o minori di L_0 la W_{max} si riduce.