

I MUSCOLI

I muscoli sono dei tessuti con comportamento attivo e presentano quattro caratteristiche distintive:

- Contrattilità: capacità di generare forza nel momento in cui gli estremi del muscolo si avvicinano;
- Irritabilità: capacità di reagire ad uno stimolo;
- Distensibilità: possibilità di essere allungato o accorciato dall'azione di una forza esterna;
- Elasticità: capacità di tornare alla condizione di riposo dopo essere stato allungato, a meno che non sia stato sovrallungato.

Si dividono in due gruppi fondamentali: muscoli striati (scheletrico e cardiaco) e lisci (tutti i muscoli involontari fatta eccezione per cardiaco).

I muscoli scheletrici sono caratterizzati da due componenti strutturali:

- 85% di fibre contrattili
- 15% di tessuto connettivo, disposto in serie (per connettere le strutture muscolari ai tendini e per modulare il trasferimento della forza) o in parallelo (per l'organizzazione strutturale dei fasci muscolari)

La disposizione delle fibre, che differenzia il ruolo del muscolo, può essere di tre tipi:

- In parallelo
- A fascio
- Pennato

I muscoli che devono essere molto veloci (sartorio, bicipite femorale, quadricipiti, tibiale anteriore) sono organizzati in parallelo o a fascio; quelli che tendono ad essere muscoli forti e stabilizzatori (dorsali, pettorali, grande gluteo) sono di tipo pennato.

Il muscolo scheletrico presenta una struttura gerarchica. Il muscolo è organizzato in *fasci* e *fascicoli*; questi ultimi contengono le unità contrattili che sono le *fibre muscolari*. La fibra muscolare è una massa sinciziale (sincizio= fusione di due o più cellule tra loro, con la formazione di una sola cellula multinucleata) circondata da una membrana detta *sarcolemma*. La struttura di base della fibra è la *miofibrilla* che a sua volta contiene il *sarcomero*. Il sarcomero è costituito dall'alternanza di filamenti di due proteine, l'*actina* e la *miosina*, che scorrono gli uni rispetto agli altri durante la contrazione

Ci sono due aspetti geometrici importanti che influenzeranno il comportamento del muscolo:

- Le fibre di actina e miosina hanno lunghezza finita.
- Le fibre di actina e miosina possono scorrere le une sulle altre, ma possono formare ponti solo nella sezione affacciata, dove le due fibre sono sovrapposte.

Quindi avremo un modello che dipende:

- Dalla durata e dall'entità dello stimolo
- Da come gli stimoli si presentano nel tempo, cioè la loro frequenza
- Dalla lunghezza del muscolo.

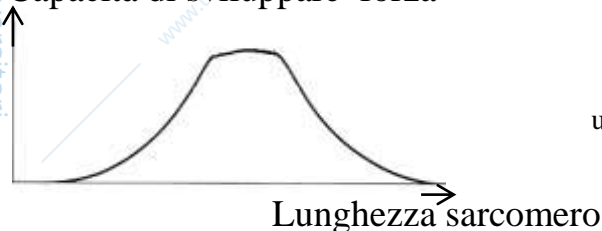
In risposta ad uno stimolo si liberano, all'interno della struttura del sincizio, degli ioni Ca^{2+} e Mg^{2+} che modulano la formazione di ponti. Questi si formano tra il filamento di actina e quello di miosina e determinano l'azione contrattile, in quanto i ponti tendono a far scorrere i filamenti gli uni sugli altri a impacchettamento.

La contrazione tende a generare l'accorciamento delle fibre. In realtà la forza che noi osserviamo è una reazione ad un vincolo.

Quindi abbiamo una dipendenza da diverse variabili:

- Dipendenza dalla lunghezza: la capacità del sarcomero di sviluppare forza può essere rappresentata più o meno così.

Capacità di sviluppare forza



Quindi c'è una lunghezza intermedia, identificata dal plateau, che massimizza la capacità di sviluppare forza, e due code vuote.

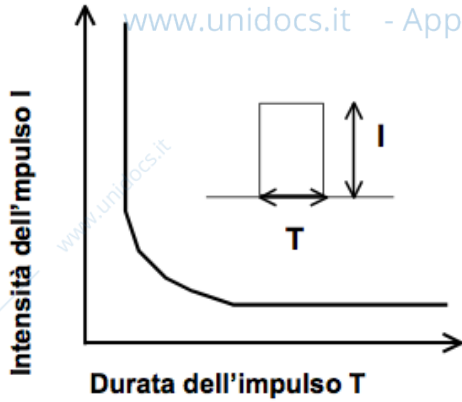
Infatti quando la fibra è troppo corta non è in grado di tirare ulteriormente, quando è troppo allungata non si verifica l'affacciamento dei filamenti e quindi non si sviluppano ponti non si genera forza.

si ha un plateau in cui abbiamo un affacciamento sufficiente a generare un numero adeguato di ponti e un certo margine ancora per accorciare la struttura.

- Dipendenza dallo stimolo: cioè necessità di un'intensità sufficiente alla formazione di ponti, che dipende dalla biochimica della formazione dei ponti. Gli ioni partono dallo stimolo, diffondono e devono arrivare in sede per generare la formazione di ponti, quindi c'è un effetto fluidodinamico di base della propagazione degli ioni all'interno del fluido.
- Dipendenza dall'intervallo degli stimoli: se uno stimolo arriva dopo un tempo sufficientemente breve rispetto al precedente, questo è più efficace perché parte da un livello di concentrazione ionica più elevato.

Il comportamento meccanico del muscolo è condizionato da una serie di parametri che sono: ampiezza e durata dello stimolo, la lunghezza di riferimento del muscolo quando questo si contrae e la temporizzazione con cui gli stimoli arrivano.

Stimoliamo la nostra fibra muscolare e vediamo come si comporta: quello che si osserva è che per quello che concerne la durata e l'entità dello stimolo, a seconda della tipologia di muscolo, si ha una soglia di base dell'entità dello stimolo che viene fornito, oltre la quale si ha una risposta del muscolo stesso, quando la soglia di base viene superata la risposta dipende sia dall'ampiezza dello stimolo (rispetto alla soglia di base) ma anche dalla durata dello stimolo stesso. Se considero lo stimolo come un'onda quadra, cioè un impulso di una certa durata T e ampiezza I normalmente il rapporto fra I e T sta su un grafico di questi tipo.



Per ottenere una risposta di una certa entità, la si può ottenere:

- con uno stimolo di una certa ampiezza
- con uno stimolo di ampiezza inferiore (ma comunque sopra soglia) di maggior durata.

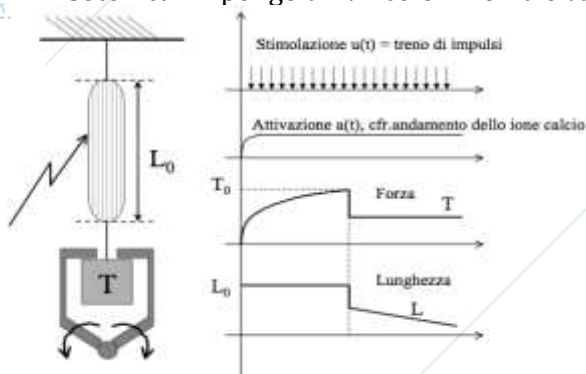
la forza massima che può essere sviluppata da un muscolo in risposta a uno stimolo, in relazione ad una lunghezza di riferimento, ha un andamento legato alla struttura del sarcomero.

Consideriamo di avere uno stimolo con caratteristiche sopra soglia, una stimolazione puntiforme nel tempo: con ampiezza breve ma di durata

sufficiente da generare una risposta muscolare e consideriamo la risposta a questo tipo di stimolo con il nome di spasmo, in termini di forza, che vediamo se andiamo a vincolare l'accorciamento del muscolo, avremo un andamento a rampa in salita abbastanza veloce. Se faccio passare un lasso di tempo sufficiente, anche questo dipende dalle specifiche condizioni muscolari, con un altro stimolo ottengo lo stesso tipo di risposta, se però gli stimoli successivi sono abbastanza ravvicinati da non fare esaurire la risposta iniziale, in risposta allo stimolo otterrò uno spasmo via via sempre più intenso, fino a che la frequenza diventa sufficiente e la contrazione è mantenuta anche se l'ingresso è una sequenza di stimoli: questa condizione è detta **tetano** ed è una condizione in cui, in risposta a una stimolazione costante cioè uno stimolo sufficiente mantenuto con frequenza sufficientemente alta, il muscolo ha una risposta costante in forza ed è interessante perché è la forza massima che il muscolo è in grado di sviluppare. La forza massima che osserviamo in condizione tetanica dipende dalla lunghezza del muscolo però non dipende da tutti gli altri parametri generici, basta che la stimolazione sia tale da generare una condizione tetanica, dopodiché il rapporto durata ampiezza della stimolazione ha poca importanza, una volta innescato il tetano, purché sia sufficiente a mantenere la stimolazione. Una volta esaurita la condizione tetanica quello che si osserva, dopo un intervallo di tempo sufficientemente basso, se si rifila un'altro stimolo, lo stimolo è più ampio dello stimolo che si otterrebbe su un muscolo a riposo, condizione che viene denominata potenziamento post tetanico. In alcuni muscoli il potenziamento post tetanico da origine a spasmi che possono avere ampiezza fino a 5 volte maggiore rispetto all'ampiezza degli spasmi del muscolo a riposo. In realtà la caratterizzazione meccanica del muscolo (struttura attiva) non possiamo aspettarci di ottenere una relazione tensione lunghezza come quella ottenuta per i tessuti passivi, una volta presente lo stimolo non è così ovvio stabilire quale sia la relazione tensione-lunghezza. Il **Modello del muscolo di Hill** parte da un tentativo di andare a formalizzare matematicamente una caratterizzazione puramente empirica, non parte da ipotesi modellistiche da verificare, fa ipotesi da verificare e le formalizza matematicamente. Hill parte considerando il muscolo in condizioni tetaniche perché di tutte le dipendenze della funzionalità del muscolo è una condizione in cui il comportamento del muscolo perde la dipendenza dalle caratteristiche durata ampiezza dello stimolo, poiché basta che lo stimolo sia sufficiente a generare la reazione e questo lo porterà in condizione di tetano sviluppando la forza massima rispetto alla lunghezza di riferimento a cui si trova. Riduco così il livello di complessità del mio problema. Il set up che fa Hill consiste in un sistema isolato in cui semplicemente fornisce uno stimolo, stimolazione per portare il muscolo in condizioni attive, ed è l'energia che fornisce, dopodiché utilizza un muscolo sartorio di rana (muscolo fusiforme) che può approssimare con una funzione lineare e lo considera in due condizioni di riferimento.

isometrica: blocco la lunghezza di riferimento e misuro la tensione opponendo un vincolo specifico

- isotonica: impongo un vincolo in forza e vado a misurare la lunghezza



Un fascio muscolare è tenuto ad una lunghezza fissa L_0 tramite una morsa alla sua estremità (contrazione isometrica). Viene stimolato elettricamente a voltaggio e frequenza sufficientemente elevati da produrre la massima tensione tetanica, T_0 (funzione di L_0) nel muscolo.

In questa condizione, il muscolo viene rilasciato improvvisamente con una forza agente pari a $T < T_0$. Il muscolo comincia a contrarsi immediatamente, e la sua velocità di accorciamento v viene misurata. L'esperimento viene ripetuto per diversi valori di post-carico T , e la relazione tra T e v viene graficata.

Parto da una condizione di riposo e l'energia che fornisco è quella dello stimolo che serve per attivare il muscolo generando condizione tetanica. Inizialmente il muscolo è a riposo, osservo rampa di salita che si porta a un valore di tensione che, quando raggiungo il tetano, la tensione si mantiene costante a T_0 che posso misurare e dipende da L_0 , la lunghezza di riferimento a cui ho clampato il muscolo. La stimolazione tende il muscolo ad accorciarsi, ma questo muscolo non può accorciarsi in quanto è clampato (vincolato) alla lunghezza L_0 quindi tende a sviluppare molta forza fino a quando sviluppa quella massima che può sviluppare che è la nostra tensione T_0 che dipende dalla lunghezza di riferimento a cui mi trovo. A questo punto il mio vincolo è il carico che ci ho appeso: la tensione sul muscolo passa da T_0 la forza tetanica

massima che cercava di vincere il vincolo, e salta al valore T , sono in condizioni isotoniche (quello che viene mantenuto è il carico ed è la mia variabile di controllo). Quello che osservo all'istante T_0 è un accorciamento istantaneo del muscolo, dopodiché una rampa in accorciamento. la tensione T , il carico che appendo al muscolo quando vado in condizioni isotoniche deve essere, inferiore alla massima tensione tetanica che può essere sviluppata dal muscolo, se fosse maggiore il muscolo cercherà di contrarsi ma si allunga, non è in grado di sostenerle. Se $T=T_0$ il muscolo sta fermo.

Questo comportamento non ci permette di fare un modello matematico di base, faccio misure termometriche, quello che Hill fa mette in relazioni queste misure di tensione, di allungamento, di forma massima con le misure energetiche.

Nel suo modello isolato, l'energia totale in gioco in questo sistema, per unità di tempo sarà uguale a:

$E=A+S+W$ dove:

A = energia che serve per attivare il muscolo(energia fornita per generare attivazione)

S = calore di accorciamento: fenomeno osservato quando il muscolo si accorcia e sviluppa calore (energia liberata dal sistema come calore)

W = lavoro eseguito dal muscolo

Questo è un bilancio di energia, ma lo posso considerare anche come bilancio di potenze in gioco istante per istante. Quello che succede in condizioni isometriche è che il bilancio si riduce a $E=A$ ovvero tutta l'energia che fornisco va in attivazione perché il muscolo non si accorcia (non si sviluppa calore di accorciamento) e non compio lavoro: è tutto fermo. La condizione isometrica viene utilizzata per stabilire la condizione di partenza, oltre a ricavare L_0 che vincola la massima tensione tetanica. In condizione isotonica conosco T (l'ho imposta io) e misuro l'andamento della velocità di accorciamento.

T_0 =massima tensione tetanica misurata in condizioni isometriche

T =carico applicato

b =costante empirica

$S=a*v$

v =velocità di accorciamento

a =costante empirica

Da cui: $b(T_0-T)=a*v+T*v$

$T*v=W$ =lavoro per unità di tempo

Per ottenere la forma dell'equazione di Hill in forma classica aggiungo e tolgo $a*b$

$b(T_0-T)=a*v+T*v+a*b-a*b$

$(v+b)(T+a)=b(T_0+a)$ **Forma dell'equazione di Hill classica**

Fornisce una rappresentazione di V e T (non è un'iperbole perché interseca assi)



La relazione è univoca fra V e T e in presenza di stimolo tetanico ci forniscono una relazione che ci descrive il comportamento del muscolo, noto lo stimolo siamo in grado di stabilire, non la lunghezza (dipende dalla lunghezza di partenza) ma una relazione con la dinamica, in cui abbiamo una certa velocità di accorciamento, messa in relazione con la tensione sviluppata dal muscolo e che dipende dal vincolo opposto.

Le due intersezioni che abbiamo con gli assi saranno in un caso T_0 = la tensione corrisponde alla velocità di accorciamento nulla, se io al muscolo applico una tensione T di vincolo uguale alla massima tensione tetanica il nostro muscolo non è in grado di accorciarsi e rimarrà alla tensione di riferimento. Se al muscolo oppongo una tensione pari a 0 non c'è nessuno vincolo ed è libero di accorciarsi questo, si accorcerà fino alla lunghezza di riferimento massima v_0 , che non compare esplicitamente nel modello ma compare nella forma adimensionale.

Forma adimensionale dell'equazione di Hill

Si ottiene dalla forma classica $(v+b)(T+a)=b(T_0-T)$

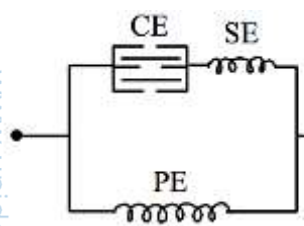
da cui: $v = b*(T_0-T)/(T+a) = v_0*(1-(T/T_0))/(1+(T/a)) = v_0*(1-(T/T_0))/(1+(c*T/T_0))$

Permette di descrivere il comportamento dell'elemento contrattile sempre in funzione di 3 parametri, a seconda di come la scriviamo, a, b, T_0 oppure v_0, c, T_0 dove T_0 dipende molto dalla lunghezza del muscolo. Ho ottenuto un modello parametrico dove fotografiamo il comportamento del muscolo in base a 3 parametri e il modello ci fornisce la relazione fra T e v . T_0 è sempre un parametro di funzionamento, se sono nell'intorno del plateau lo considero costante, altrimenti può cambiare. V_0 dipende molto poco da L_0 , lunghezza di riferimento. A è proporzionale a T_0 per cui ha una dipendenza di L_0 puramente osservazionale, sono costanti empiriche. B , è una costante e non dipende da L_0

La dipendenza che viene manifestata dai diversi parametri è "critica" in quanto dipende da L_0 per T_0 e a mentre b e v_0 non mostrano dipendenza da L_0 .

Quando $T=0$ la velocità di accorciamento raggiunge il suo valore massimo $v_0 = -b*(T_0/a)$

IL modello del muscolo di Hill fornisce una descrizione del comportamento della parte contrattile della nostra struttura muscolare, non fornisce nessuna informazione su L0, ma fornisce informazione limitata alla stimolazione tetanica (parecchio riduttiva), in relazione a quella che è v nel momento in cui al muscolo viene imposta una tensione di vincolo al di sotto della massima tensione tetanica. Lo stimolo genera cinematica, la tensione che viene sviluppata non dipende dal muscolo ma dal vincolo, e se il muscolo è capace di vincere o no il vincolo: se ci riesce si accorcia e ha una tensione pari a quella del vincolo. La lunghezza è qualcosa che viene imposto, che condiziona i parametri, non abbiamo una descrizione della lunghezza, non abbiamo nulla che quantifica il vincolo: il muscolo risponde a tensioni di vincolo, non la sviluppa. Il tessuto connettivo si trova all'interno del muscolo in serie e in parallelo, in serie perché il tessuto connettivo interconnette i diversi pezzi dei fasci. Il modello che otteniamo, formulato da Hill, è di questo tipo: MODELLO A 3 ELEMENTI:



Abbiamo nella versione semplificata un elemento contrattile che è l'85% delle fibre all'interno del nostro muscolo e un elemento in serie, che è la parte del tessuto connettivo, collocato in serie con l'elemento contrattile e l'elemento parallelo che è la parte del tessuto connettivo che mantiene la struttura, ha un ruolo meccanico minimo, non è una vera e propria struttura portante.

Ha un ruolo meccanico molto importante l'elemento serie perché porta la stessa forza dell'elemento che presenta dinamica. Sarà questo che modula la tensione che viene trasmessa all'elemento contrattile.

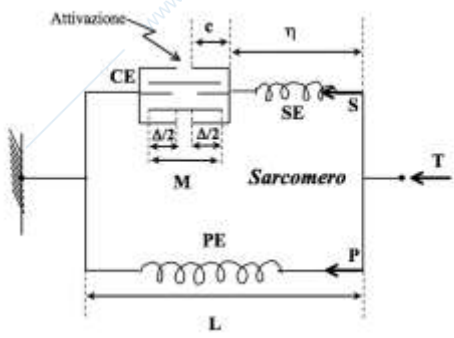
In generale l'elemento serie e parallelo, essendo di tessuto connettivo, a rigore si potrebbero modellare come elementi viscoelastici, uso una versione più semplificata dove considero elemento serie e parallelo come puramente elastici non lineari.

- **L'elemento contrattile (CE)**, assunto come liberamente estensibile a riposo, cioè quando produce tensione nulla, è in grado di accorciarsi quando è attivato.
 - **L'elemento elastico in serie (SE)**
- Per tenere conto dell'elasticità del muscolo a riposo viene aggiunto:
- **L'elemento elastico in parallelo (PE)**

- La possibile spiegazione del significato fisico dei 3 elementi è:
- CE:** lo scorrimento dei filamenti di actina-miosina dove l'attacco e distacco dei ponti in risposta all'attivazione produce una tensione attiva.
 - SE:** elasticità dei filamenti, bande Z e tessuto connettivo. Può derivare anche dalla non uniformità della lunghezza del sarcomero.
 - PE:** elasticità del tessuto connettivo, delle membrane cellulari, dei mitocondri e degli strati collaginei.

MUSCOLO SCHELETRICO

Lunghezza η elemento elastico non lineare SE (elemento serie)
 CE (elemento contrattile) caratterizzato da una lunghezza L_c lunghezza di CE = $2C+M-\Delta = L_{max} - \Delta$
 La variabile che ne caratterizza la lunghezza è Δ sovrapposizione tra i filamenti
L lunghezza del sarcomero (Fattore di scala \rightarrow Lunghezza del muscolo) **M** lunghezza del filamento di Miosina, η elongazione di SE, **S** tensione su SE e **CC** lunghezza del filamento di Actina, **2C+M** lunghezza massima del sarcomero (nessuna sovrapposizione L_{max})



Lo vincolo da una parte e dall'altra applico una tensione T positiva in senso opposto rispetto agli elementi passivi, perché ci interessa caratterizzarlo nella sua forma contrattile, se lo considero in condizioni passivi è viscoelastico.

Ci sarà una tensione T, che sarà una variabile in gioco, la tensione T si distribuirà sui due rami serie e parallelo e vi sarà una componente S e una P.

Da un punto di vista dell'azione strutturale, considerando cosa fanno i due pezzi di connettivo: quello in serie vincola le strutture al contrattile (parte più forte) e quella in parallelo, è in quantità molto piccola, strutturale, ed è in grado di portare poca forza per cui $S \gg P$.

$L_c = L_{cmax} - \Delta = M - 2C - \Delta$

Con equazioni che descrivono il sistema:

Equazione che determina congruenza lunghezza: $L = L_c + \eta = L_{cmax} - \Delta + \eta$ ma $L_{cmax} \gg \eta$ $L \sim L_{cmax}$ perché vi è 15% connettivo e una parte è messo in parallelo, è davvero poco rispetto alle fibre contrattili

Equazione che determina il bilancio delle forze: $T = S + P$ ma $S \gg P$ $T \sim S$ il tessuto connettivo in parallelo è molto poco e sviluppa poca forza

Relazioni puramente elastiche non lineari elemento serie e parallelo $P = P(L)$ e $S = S(\eta)$ relazioni simili a quella che lega risposta elastica istantanea a rapporto di allungamento quindi relazioni in cui posso aver

$$P = (P^* + \beta_p) e^{\alpha_p(L-L^*)} - \beta_p$$

P avrà così poca forza che tendo a trascurare la sua relazione matematica

Relazione che caratterizza elemento contrattile: equazione descritta dalla legge di Hill (in condizioni tetaniche non è stata ancora generalizzata)

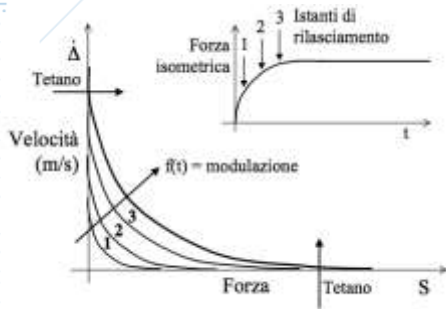
$$-\dot{L} = \dot{\Delta} = b \frac{S_0(L_c) - S}{S + a}$$

dove T e T0 in questo caso sono S(η) e S0(Lc) ≈ L per qualunque muscolo che non abbia grosse cicatrici.

Trattando un muscolo scheletrico tutte queste cose vengo a decadere, queste approssimazioni le leghiamo al contesto specifico, nel senso che se all'interno del muscolo ho una lesione è chiaro che questo si va a sommare a quegli elementi P ed S che diventano più grandi sbandando tutte le considerazioni fatte fino adesso. Al momento la mia legge dell'elemento contrattile vale solo per le condizioni tetaniche, ma i muscoli normalmente non funzionano così, è necessario andare a valutare il comportamento del muscolo in condizioni in cui lo stimolo non ha raggiunto la condizione tetanica:

Hill ripete lo stesso tipo di sperimentazione, uguale identica però non andandolo a valutare per vari valori di ampiezza e lunghezza perché in realtà, quello che fa è dire: posso ottenere diversi livelli di attivazione del muscolo in risposta a diverse combinazioni di ampiezza e durata dello stimolo, però alla fine quello che importa, è il livello di attivazione del muscolo, che sono quelli compresi fra 0 e il tetano, quando è attivo.

Quindi rilascia la clamp una volta raggiunto T0, rilasciando la clamp in questa rampa di salita, di volta in volta fra valori di attivazione compresi tra 0 e 1 cioè dove osservo in condizioni isometrica la massima tensione sviluppata. Fa lo stesso identico tipo di esperimento, rilasciando la clamp non quando raggiungo il tetano, ma per tanti valori di tensioni più bassi (il muscolo è attivato meno), misurando le forze, la tensione sviluppata, la T0 a cui rilascio clamp che non è più la massima tensione tetanica, le v, fa il fitting delle curve, processo identico a prima ma partendo da condizioni di attivazioni diverse. Quello che ottiene sono curve dove di volta in volta ho valori di tensione T2, T3... a cui rilascio la clamp e queste sono le massime velocità che riesco a ottenere con quelle tensioni.



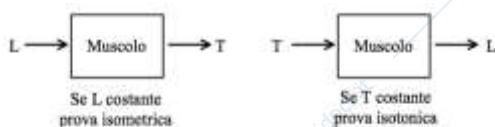
l'origine degli assi è la condizione in cui il muscolo è a riposo, dove non ho tensione e velocità di accorciamento. Si ottiene una serie di curve simili che vanno da una condizione di inattivazione 0 a una condizione in cui l'attivazione è 1 che corrisponde a livelli di tensione che sono il valore di T0 moltiplicati per un numero compreso fra 0 e 1. La velocità di accorciamento diventa 0 per T=T0 (nell'esperimento precedente eravamo in condizioni isometriche), in questo caso siamo in condizioni isometriche con uno stato di attivazione più basso, la velocità di accorciamento è nulla quanto T/T(0)=f(t), è uguale a una quantità non uguale a 1 ma è minore di 1

$$\Delta = v_0 \frac{f(t) - \frac{S}{S_0}}{1 + c \frac{S}{S_0}}$$

f(t)=0 riposo
f(t)=1 tetano

Il nostro modello contiene elementi strutturali in gioco: 85% di elemento contrattile e 15% di connettivo in serie e in parallelo, e abbiamo generalizzato un comportamento che non vale più solo in condizioni tetaniche ma in qualsiasi condizioni di attivazione tra riposo e tetano. La parte di connettivo è molto piccola e che la lunghezza dell'elemento contrattile sia circa uguale alla lunghezza di tutto il muscolo e quindi considerare quella come lunghezza di riferimento per caratterizzare il comportamento dell'elemento contrattile. Questo sistema non ci da sempre una soluzione univoca in termini di lunghezza e tensione: ho 6 variabili e 5 equazioni, per cui il comportamento del nostro sistema non è determinato in modo univoco, dobbiamo sempre andare a considerare di fornire al funzionamento del nostro sistema o una certa legge di allungamento o una certa legge di carico: funziona sempre noto lo stimolo da cui non possiamo prescindere, essendo un sistema attivo, o governato in lunghezza con una risposta in tensione oppure governato in tensione con una risposta in lunghezza e questo sono le condizioni di riferimento che abbiamo nell'esperimento di Hill.

In un caso la condizione isometrica dove il comportamento del sistema è governato in lunghezza, in quanto viene imposta lunghezza costante e fissa mentre nella seconda fase abbiamo la condizione isotonica dove il comportamento del sistema è governato in tensione in quanto viene imposto un vincolo di un certo tipo e osservo quello che accade in lunghezza.



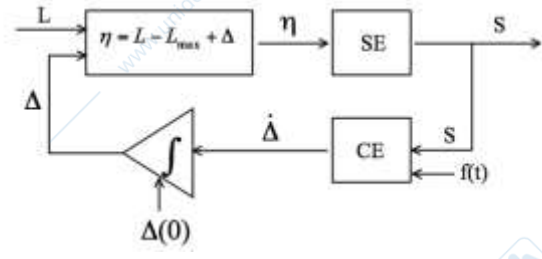
Il ruolo meccanico dell'elemento in parallelo è minoritario perché la realtà è poco connettivo con poca capacità portante quindi quello che faremo è semplificare il modello trascurando l'elemento parallelo con un modello semplificato che di norma prende in esame solo l'elemento serie cioè S=T

In questo caso le variabili in gioco sono 4 e sono: L, S, η, delta
come equazioni in gioco perdo: P=P(L) caratterizzazione elemento parallelo
T=S+P equazioni bilancio forze

Ho perso 2 variabili e 2 equazioni, andando a semplificare il modello non è diventato subito controllabile.

Il modello lo posso considerare o guidato in tensione o in lunghezza, vediamo in un sistema a blocco quali sono gli elementi in gioco

Sistema guidato in lunghezza:



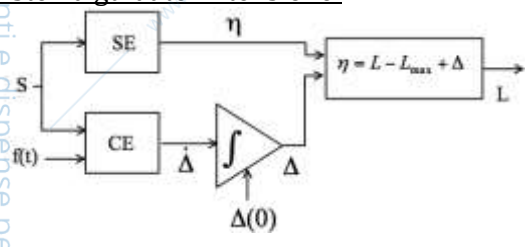
Risponde subito a qualunque andamento della lunghezza l'elemento elastico serie, nel primo blocco ho una legge, L determina la lunghezza dell'elemento elastico, l'elemento contrattile di cui sottoposto ha uno stimolo tenderà ad accorciarsi ma partirà dalla lunghezza in cui è, non è che di punto in bianco cambia allungamento. L' elemento elastico serie risponderà in base alla legge di congruenza delle lunghezze $\eta = L - L_c = L - L_{cmax} + \Delta$ $L_c =$ lunghezza a cui si trova elemento contrattile lui è a lunghezza costante, dopo lo stimolo parte e si accorcia.

La lunghezza dell' elemento elastico dipende dalla lunghezza dell' elemento contrattile.

La tensione è determinata dall'elemento elastico perché come detto, l'elemento contrattile non genera una tensione univoca in base alla sua lunghezza, porta ciò che gli viene dato in vincolo. η determina la tensione S

Come si accorcia l'elemento contrattile dipende da quanta forza vi è sopra, S è quella che va dentro l'elemento contrattile insieme all'elemento di attivazione. Dall'elemento contrattile esce la velocità di accorciamento cioè la derivata di delta (Δ°) determinata dalla condizione di stimolo la quale determina tensione. Δ° lo integro e ottengo in uscita il delta che va in ingresso.

Sistema guidato in tensione:



Se impongo una tensione questa si divide fra elemento contrattile e elemento elastico determinando istantaneamente l' accorciamento dell'elemento contrattile e la variazione di lunghezze dell'elemento elastico. In ingresso all'elemento contrattile avrò anche f(t) da cui determino la velocità di accorciamento a partire dalla lunghezza di riferimento iniziale, e dall'elemento contrattile uscirà η ed entrambe contribuiranno a determinare L

Se guido in lunghezza parto da una condizione in lunghezza di riferimento, l'elemento contrattile è continuo in lunghezza, agisco sulla lunghezza dell'elemento serie che determina un bilancio fra le lunghezze e la forza è una conseguenza della condizione iniziale dell'elemento elastico, e la forza determina come si accorcia il contrattile.

Se guido in tensione che governa direttamente l'elemento elastico e contrattile, in relazione a questi due determino la lunghezza complessiva della struttura.

CARATTERIZZAZIONE DI SE E CE:

Consideriamo il veloce rilascio a partire dalla stimolazione tetanica (esperimento di Hill, dove la tensione si CE ed SE è S). Durante la fase isometrica, contrazione S crescente fino alla tensione tetanica e lunghezza L_0 prima del rilascio veloce, il sistema può essere studiato con il primo diagramma a blocchi ($L \rightarrow T$). Durante la fase isotonica, dopo il rilascio veloce, tensione $T_0 < T$ ed L decrescente linearmente, deve essere usato il secondo diagramma a blocchi per il calcolo.

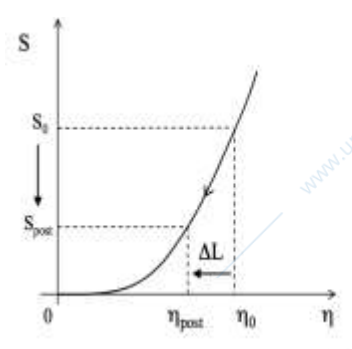
CARATTERIZZAZIONE DI SE:

se t_R è l'istante di rilascio:

$t = t_R^- \rightarrow S = S_0$

$t = t_R^+ \rightarrow S = S_{post} < S_0$

Δ è discontinuo per $t = t_R$ ma Δ non lo è (Δ è discontinuo perchè lo è S). Quindi la discontinuità in $L = \eta + L_{max} - \Delta$ è dovuta solo a SE.

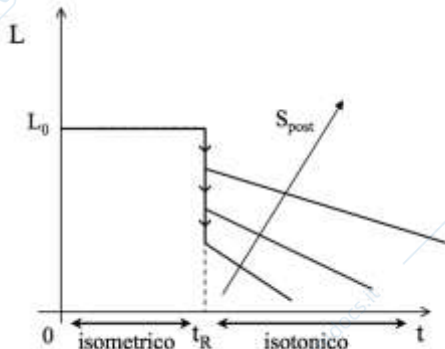


Il responsabile della discontinuità in lunghezza è SE, perché CE è continuo in lunghezza non ha delle discontinuità, si può accorciare con una velocità descritta dall'equazione costitutiva dell'CE ma non è fatto per avere delle discontinuità in lunghezza (c'è una tensione quello parte dal punto in cui è incomincia ad accorciarsi) mentre l'elemento elastico (in quanto elastico) se ha a disposizione un carico risponde con una discontinuità in lunghezza, il carico passa da S_0 ad S_{POST} istantaneamente (l'unico elemento in grado di rispondere a questo tipo di discontinuità è sempre l'elemento elastico che non ha la dinamica).

$S(\eta)$ tensione sul nostro elemento elastico (S funzione della lunghezza elemento elastico) non avendo una dinamica se all'inizio se all'inizio era ad S_0 inevitabilmente in un elemento elastico la lunghezza è determinata da questo valore di S_0 (nell'istante immediatamente prima del rilascio) dopo di che dopo il rilascio passa ad S_{POST} (qualunque valore esso sia) per cui quello che succede inevitabilmente perché l'elemento elastico deve stare su sta curva (l'unico posto in cui può essere) ho che la lunghezza dell'elemento elastico passa istantaneamente al valore qua (penso sia η_{post}) che sarà la nuova lunghezza e questo intervallo sarà lo stesso ΔL

Quindi quella discontinuità in lunghezza è totalmente dovuta alla parte elastica non lineare in serie alla parte contrattile all'interno del modello, perché l'elemento contrattile una volta che ho una tensione che percorre la struttura da quel punto in poi tenderà ad accorciarsi, però istantaneamente mantiene la lunghezza da prima del rilascio e dopo il rilascio.

Variando S_{post} si possono tracciare le diverse curve caratteristiche.



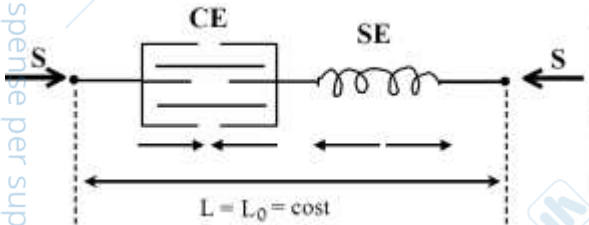
Al crescere del carico S_{post} diminuisce la pendenza, cioè la velocità di accorciamento del muscolo.

CARATTERIZZAZIONE DI CE:

Per $t > t_r$:

$$\dot{\Delta} = v_0 \frac{1 - \frac{S_{post}}{S_0}}{1 + c \frac{S_{post}}{S_0}} = -\dot{L}$$

CARATTERIZZAZIONE FASE ISOMETRICA



$$\begin{cases} \dot{\Delta} = v_0 \frac{f(t) - \frac{S(\eta)}{S_0}}{1 + c \frac{S(\eta)}{S_0}} = \varphi(\eta, f) \\ S(\eta) = \beta_s (e^{\alpha_s \eta} - 1) \end{cases}$$

elemento contrattile

elemento elastico

$L =$ lunghezza totale elemento

Equazioni:

Parto da una condizione di riposo 0^- quindi condizioni iniziali per come viene realizzata alla partenza in 0 ho:

- $S(0)=0$
- $f(0)=0$ attivazione a 0^- è nulla ovviamente per 0^+ quindi cambia, può non essere un cambiamento così graduale dipenderà del treno di stimoli (da 0^- è spenta dopo di che 0^+ si attiva)
- $\eta(0)=0$ per come ho scritto la caratteristica dell'elemento elastico, $\eta(0)=0$, η può non essere nullo però a noi quello che interessa è il fatto che sia una lunghezza di riferimento meccanica nulla per come l'ho scritta, posso sempre metterci un offset e rappresentarla in questa maniera qua, quando $\eta > 0 \rightarrow S(\eta) > 0$ (appena eta diventa > 0 S diventa non nulla) per cui descrivendo il nostro elemento elastico $\eta(0)=0$.

Per quanto concerne il comportamento meccanico ho che allo spunto $S(0)=0$ dopo di che partirà il reclutamento quindi l'attivazione e come sopra la lunghezza è nulla.

Per quanto riguarda come sono accoppiate queste 2 equazioni in questo caso abbiamo che la lunghezza totale dell'elemento elastico è costante data da:

$$L = L_{c \max} - \Delta + \eta$$

Come varia questa lunghezza L?

$$L = \text{cost} \rightarrow \dot{L} = -\dot{\Delta} + \dot{\eta} = 0 \rightarrow \dot{\eta} = \dot{\Delta}$$

Si consideri $f(t) = 1$ costante (tetano).

Tanto si accorcia l'elemento contrattile tanto si allunga l'elemento elastico (secondo la regola della serie)

Però se siamo in condizioni isometriche la lunghezza totale è costante $L = \text{cost}$

Quindi

$$\begin{cases} \dot{\eta} = v_0 \frac{f(t) - \frac{S(\eta)}{S_0}}{1 + c \frac{S(\eta)}{S_0}} = \varphi(\eta, f) \\ S(\eta) = \beta_s (e^{\alpha_s \eta} - 1) \end{cases}$$

elemento contrattile
dipende da η, f

elemento elastico
dipende da η

Il sistema è non lineare, quindi non lo risolverò mai ma posso andare a linearizzare nell'intorno dei punti di funzionamento che ci se lo vado a linearizzare vedo che forma ha dopo di che punto per punto l'andamento dipenderà dal valore specifico che viene raggiunto, per cui se lo linearizziamo dopo dovrebbe essere risolto in forma numerica, lo andiamo a linearizzare dopo di che di volta in volta andiamo a sostituire il punto di arrivo.

Per vedere qualitativamente come va questa cosa lo andiamo a linearizzare in 0 e vediamo come parte il sistema in 0 in conosco già il valore di $S(0)=0, \eta(0)=0$

Mi calcolo la linearizzazione in questo sistema considerando che $\dot{\eta}$ dipende η, f mentre S dipende η
 Il sistema linearizzato mi darà come varia $\dot{\eta}$, come varia S , dato da

$$\begin{cases} \delta \dot{\eta} = \left. \frac{\partial \varphi(\eta, f)}{\partial \eta} \right|_0 \delta \eta + \left. \frac{\partial \varphi(\eta, f)}{\partial f} \right|_0 \delta f \\ \delta S = \left. \frac{\partial S}{\partial \eta} \right|_0 \delta \eta \end{cases}$$

Queste sono le variazioni, lo sviluppo in serie di Taylor il cui valore nel punto = valore del punto di partenza (non c'è perché intorno a 0 ho $S(0)=0, \eta(0)=0$) + la variazione del primo ordine che dipende dalle variabili in gioco, quindi inizialmente il sistema è fermo, ha una lunghezza di riferimento nulla, la tensione è nulla quindi è 0 + una variazione (l'andamento dipende dalle variabili in gioco e da quanto queste variano nell'intorno del punto 0).

$$\delta \dot{\eta} = v_0 \frac{-\frac{1}{S_0} \frac{\partial S}{\partial \eta} \left[1 + c \frac{S(\eta)}{S_0} \right] + \left(f(t) - \frac{S(\eta)}{S_0} \right) \frac{c}{S_0} \frac{\partial S}{\partial \eta}}{\left[1 + c \frac{S(\eta)}{S_0} \right]^2} \delta \eta + \frac{v_0}{\left[1 + c \frac{S(\eta)}{S_0} \right]} \delta f$$

$$\delta S = \alpha_s \beta_s \delta \eta$$

Nello 0 ho $S(\eta)=0, f(t)=0$ -> dentro al 1° termine si annulla il 2° termine, a denominatore rimane 1

$$\begin{cases} \delta \dot{\eta} = - \underbrace{\frac{v_0}{S_0}}_{*} \delta S + \underbrace{v_0}_{*} \delta f \\ \delta S = \alpha_s \beta_s \delta \eta \end{cases}$$

*2° termine funzione del termine noto perché dipende da quanto è il δf , f può avere una discontinuità tra l'inizio e la fine perché è l'attivazione (quindi lo si lascia espresso in questo modo)

*1° termine viene guidato da come funziona l'elemento elastico

Dalla seconda equazione

$$\delta \dot{\eta} = \frac{\delta S}{\alpha_s \beta_s}$$

Sostituisco nella prima equazione

$$\delta \dot{S} = \underbrace{\frac{-v_0 \alpha_s \beta_s}{S_0}}_{1/\tau \text{ costante di tempo}} \delta S + \underbrace{v_0 \alpha_s \beta_s}_{\text{termine noto}} \delta f$$

equazione differenziale del I° ordine

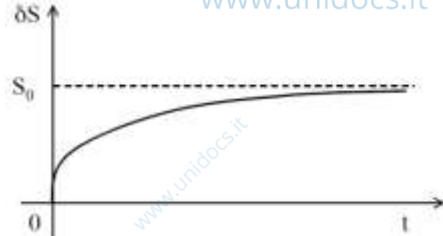
Mi dice quale è l'andamento grosso modo della δS nel tempo, è una equazione differenziale lineare primo grado. Il termine noto dipende da δf che dipende da come cambia l'attivazione

La dinamica è data dalla prima parte che come già visto per il modello visco-elastico matematicamente è la stessa identica cosa quello che ho è una costante di tempo $1/\tau$ che governa un esponenziale di δS rispetto a δS

posto $\frac{1}{\tau} = \frac{v_0 \alpha_s \beta_s}{S_0}$ ($\approx 17\text{ms}$)

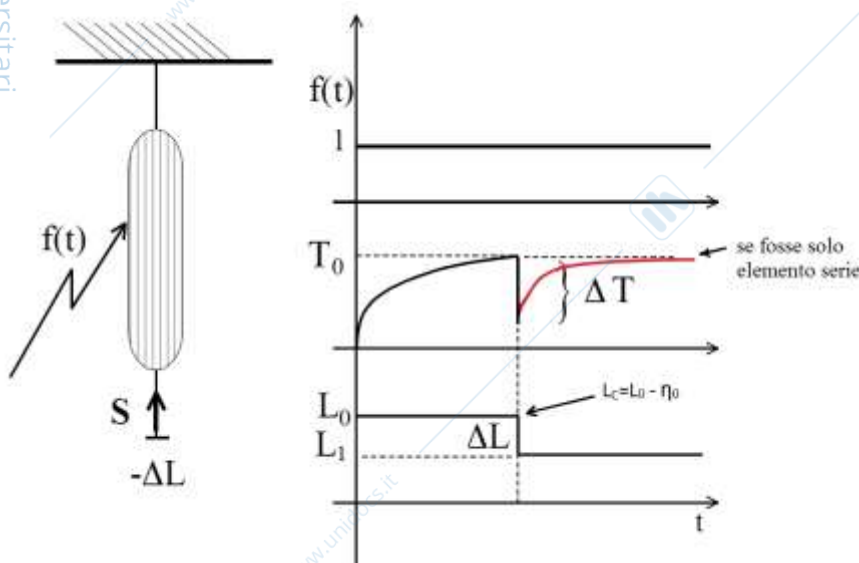
α_s, β_s : 2 caratteristiche dell'elemento elastico

fondamentalmente quello che dice è che si ha uno spunto (non è corretto dire che va sempre così) fondamentalmente ho che dal punto di partenza la variazione δS viene data da un andamento esponenziale con questa costante di tempo $1/\tau$ + un termine che dipende dal livello della variazione attivazione in quel punto, **parte con una certa velocità arriva ad un certo punto che rimane solo la costante di tempo**, è più o meno qualitativamente l'andamento osservato quella crescita progressiva fino al valore S_0



Quindi nel caso della parte isometrica l'azione della componente elastica della componente contrattile è inevitabilmente connessa, ho che in S il termine costante di tempo dove compaiono sia 2 parametri della componente contrattile v_0, S_0 ricompaiono anche i 2 parametri della componente elastica $\alpha s, \beta s$ perché cosa succede in pratica per cui ho quel andamento di S che parte con una certa velocità e poi rallenta con questo andamento sempre pseudo esponenziale? Matematicamente va così, come lavorano insieme questi 2 elementi (nella parte isotonica avevo una discontinuità dato dall'elastico, si ferma sta lì dopo di che l'altro si contrae) nel nostro caso quando lo governo in lunghezza, parte da spento per cui parte in condizioni in cui l'elemento elastico non porta niente, quindi all'inizio la tensione è nulla e la componente contrattile parte che viene attivata cosa succede fate finta che $f(t)$ è un gradino, quindi parte da zero ed è subito attivata, succede che partendo dall'inizio: $S=0$ tensione nulla l'elastico parte dalla sua lunghezza di riferimento, parte l'attivazione quindi parte l'elemento contrattile si accorcia, se l'ingresso è a gradino si accorcia lui parte la tensione è nulla con velocità iniziale v_0 l'attivazione è totale parte con tutta la velocità che può, dopo di che passa un δt cosa succede? (la tensione è uguale su tutti e 2 sempre) la molla si allunga quindi sviluppa forza, (l'elemento contrattile non sviluppa forza nella sua vita si accorcia) il fatto che l'elemento contrattile in un δt è partito e si è accorciato un po' vuol dire che ho v_0 su quel δt che parte e va sulla molla e la molla se si allunga sviluppa tensione, quindi avremmo la tensione corrisponde ad $v_0 * \delta t$, a quel punto succede che quella tensione viene esercitata sull'elemento contrattile, a questo punto l'elemento contrattile rispetto alla condizione di prima se c'è un po' di tensione continua a contrarsi ma con una velocità minore perché la tensione sviluppata sarà piccola però rallenta un po', però sviluppa un altro accorciamento quindi l'elemento elastico svilupperà un po' più di forza che fa rallentare l'altro, dopo di che c'è questo loop in cui continua ad aumentare la forza, però da cosa dipende la velocità con cui aumenta la forza? La forza è determinata dall'elemento elastico, quindi in base a come si allunga l'elemento elastico guida la dinamica della forza (la dinamica della forza è determinata dalla dinamica dell'elemento elastico) però l'elemento elastico si allunga in base a come si accorcia l'elemento contrattile quindi il fatto che aumenti gradualmente la forza determina il rallentamento dell'elemento contrattile, quindi più la forza aumenta più l'elemento contrattile rallenta per cui ho questo andamento e tendiamo ad un valore sempre più piano, rimane che ci arriviamo a quel valore, perché il tutto si ferma quando (elemento elastico è molto piccolo rispetto l'elemento contrattile quindi fisiologicamente si potrebbe accorciare quanto vuole ed ho una lunghezza tale per cui non esco dal plateau) l'elemento contrattile si ferma in attivazione tetanica quando l'elemento elastico è diventato tanto lungo da sviluppare la tensione tetanica oppure quella parte di tensione tetanica compatibile con il livello di attivazione, se l'attivazione è 1 quando η è tale da aver generato tensione tetanica sull'elemento elastico a quel punto si ferma.

Rimane da vedere **quando è importante considerare l'elemento parallelo**, per ragionarci consideriamo una condizione sperimentale. Se facciamo l'esperimento di Hill, questa volta consideriamo 2 condizioni isometriche in sequenza, invece che considerare una isometrica e una isotonica facciamo **2 condizioni isometriche**.



Consideriamo l'attivazione come sempre un gradino unitario, non ci interessa la dinamica iniziale facciamo in modo di arrivare in condizioni tetaniche.

La prima parte la conosciamo L_0 arrivo ad un certo valore T_0 dopo di che ho l'istante di rilascio però molliamo la clamp e la riblocco subito con una lunghezza L_1 e l'attivazione è sempre tetanica.

Cosa vedo sulla tensione?

Il primo pezzo è quello che abbiamo appena visto in cui ho raggiunto una condizione in cui il vostro η

lunghezza totale L_0 di questa lunghezza totale l'elemento contrattile avrà la sua lunghezza, sta di fatto che si è fermato quindi chi è che mi dice a che lunghezza è. Se so che la dinamica si è esaurita perché sono in S_0 . Se il pacchettino è di lunghezza L_0 e la dinamica si è esaurita come faccio a sapere a che lunghezza è l'elemento contrattile? Guardo quanto è lunga la molla e lo sottraggo ad L_0 e la molla è lunga in base al valore S_0 (è quello che fa la molla).

Avrò che la lunghezza elemento contrattile sarà $L_c = L_0 - \eta_0$ in quel punto

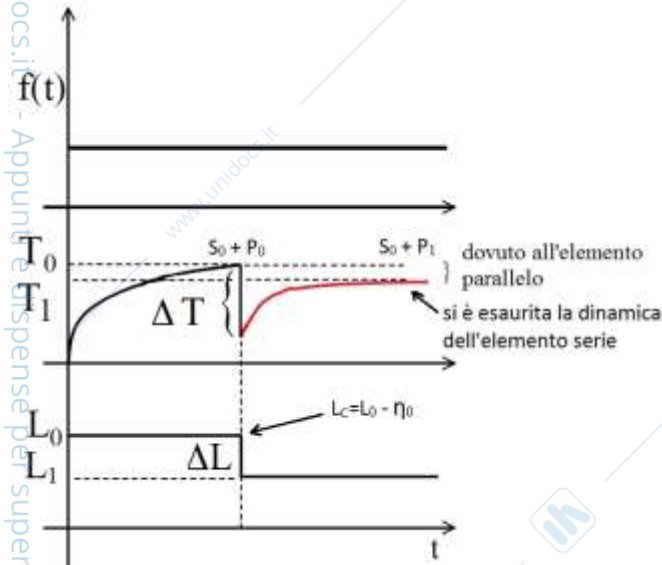
Dopo di che mollo tutto e istantaneamente riblocco tutto ad L_1 cosa succede?

Istantaneamente chi si prende ΔL ? L'elemento elastico perché l'elemento contrattile è continuo.

Quindi osservo sulla tensione istantaneamente, ora lo governo da η (prima passando ad isotonica lo governavo da S) osservo un ΔT vedrò un salto di tensione (ora lo chiamo ΔT poi ci ragiono) dopo di che ho ribocato la lunghezza sono in una nuova fase isometrica la mia molla si è accorciata e ho una tensione più bassa della massima tensione tetanica vedo che qualitativamente? (quantitativamente ce lo dice la prof perché è un dato sperimentale) la tensione è calata (ha avuto un cambiamento finito significativo) l'attivazione è 1, l'elemento contrattile incomincia ad accorciarsi quello che vedo è un andamento analogo a quello precedente che si fermerà quando sull'elemento contrattile ho di nuovo la tensione tetanica.

Se fosse solo l'elemento serie dovrei tornare anche se l'ho accorciato alla tensione T_0 che avevo prima.

Invece se lo faccio sperimentalmente quello che vede ho lo stesso andamento ma



Perché se lo accorcio e lo riattivo e non sono uscito dall'intervallo del plateau (non è cambiata la caratteristica dell'elemento contrattile) arrivo ad un punto un po' più piccolo di T_0 ? (Sto lavorando con un muscolo intero quindi ho del margine) è dovuto all'elemento parallelo perché quando ho esaurito il nuovo transitorio (2° transitorio) quando sono ad L_1 a che lunghezza è l'elemento serie? Se è al secondo transitorio e si è esaurito il 2° e l'attivazione è unitaria vuol dire che sull'elemento contrattile ho la tensione tetanica quindi sull'elemento serie ho la tensione tetanica così come ce l'avevo prima.

Quindi esaurito il 2° transitorio quanto è lungo l'elemento serie? È di nuovo lungo η_0 .

La meccanica dell'elemento contrattile si ferma sempre per lo stesso livello di tensione, quindi la lunghezza dell'elemento serie è uguale. Il fatto che lunghezza totale sia più piccola non importa perché abbiamo che l'elemento contrattile si ferma quando ha quel livello di tensione, finché rimango fuori da quelle code di comportamento non ha nessuna importanza si ferma per altri motivi.

Quindi se ho una differenza di lunghezza all'inizio se la prende tutta l'elemento serie perché può essere discontinuo in lunghezza, però alla fine tutta la dinamica si ferma quando l'elemento parallelo sente la tensione tetanica quindi alla fine tutto quel ΔL per il ramo serie è sull'elemento contrattile, perché l'elemento serie deve portare allo stesso livello di tensione.

Per quanto concerne il ramo serie succede questo, se non sono uscito dalla modalità di funzionamento in cui posso considerare la tensione tetanica costante quindi l'intervallo di plateau, io avevo sull'elemento serie S_0 prima e ho S_0 dopo c'è stata tutta quella dinamica all'inizio perché uno non può essere discontinuo la deformazione se la prende tutta l'elemento elastico in serie poi l'elemento contrattile riparte accelera però alla fine avrò sempre S_0 .

Perché T_1 è un po' più piccolo di T_0 se la tensione sull'elemento serie è uguale? (per forza è uguale perché la dinamica dell'elemento contrattile è governata dalla tensione) dipende dall'elemento parallelo, perché?

Soprattutto l'elemento parallelo dalla condizione in cui ero in L_0 alla condizione di L_1 ha una dinamica? L'elemento parallelo è elastico prima avevo L_0 e dopo L_1 ed $L_1 < L_0$ e la differenza che si vede è dovuta all'elemento parallelo perché nella condizione L_0 nella condizione L_1 sull'elemento serie avevo S_0 prima e alla fine ho S_0 dopo, quella piccola differenza che vedo tra le 2 condizioni è totalmente dovuta all'elemento parallelo, perché esaurita la dinamica che governava l'elemento contrattile avevo S_0 sull'elemento serie e dopo S_0 sull'elemento serie, prima avevo $S_0 + P_0$ dopo avevo $S_0 + P_1$, P_1 è il valore che ha l'elemento parallelo in 1 che piccolino perché l'elemento parallelo porta poca roba per cui anche se gli do una grande differenza di lunghezza la differenza di quello che porta è piccola perché il grosso è sull'elemento serie, però fondamentalmente la sequenza data una lunghezza L_0 data una lunghezza L_1 quello è un elemento elastico non lineare quello che vi pare però è quel pezzettino in più che sentite piccolo finché vi pare e potete caratterizzare il comportamento dell'elemento parallelo in questa maniera perché su tutti e 2 ho S_0 la differenza è esattamente quello che portava con lunghezza 0 e quello che porta con lunghezza 1.

La differenza sta nel fatto che nel ramo in cui avete l'elemento contrattile la lunghezza totale non è che determina necessariamente quella che è la tensione sull'elemento serie perché avete che l'elemento contrattile se rimanete nei vincoli di funzionamento (però l'elemento serie è piccolo è difficile uscirne come lunghezza assoluta) l'elemento contrattile può avere qualunque lunghezza virtualmente, il fatto che l'elemento serie sia molto corto fa sì che quell'elemento contrattile abbia del gioco.

Quindi l'elemento contrattile può avere qualunque lunghezza, alla fine quanto l'elemento è lungo viene è determinato solo dalla tensione che c'è sopra che è quello che determina se sta cosa si muove oppure no.

L'elemento parallelo invece prende la lunghezza totale e basta, quindi se è più corto porta un po' meno (è piccolo porta poco) però è quello che mi determina tra 2 condizioni isometriche quel poco di differenza non è che è cambiata la caratteristica dell'elemento contrattile, il ramo serie porta sempre la stessa cosa se siete nell'intervallo di funzionamento regolare in una condizione isometrica e nell'altra, la piccola differenza totale che vedete è quel piccolo contributo del parallelo che se si è accorciato cambia.

Questa cosa lo si vede a regime, sull'istantaneo è talmente tanta la discontinuità che ho avuto sull'elemento serie che è quella che porta di più che tutta sta roba qua è quello che succede sull'elemento serie, è ovvio che qua c'è anche questa differenza qui ma il grosso del dinamico è sull'elemento serie, quello che vedo sull'elemento parallelo lo riesco a vedere quando si è esaurita la dinamica dell'elemento serie, qui (alla fine) si è esaurita la dinamica dell'elemento serie, quindi è il fatto che io se vado a confrontare il valore a regime che vedevo la e il valore a regime che vedo qua questo è un po' più piccolo, poco io gli ho dato una grande differenza di lunghezza ma è di poco, però tutta questa roba qui è dovuta al parallelo perché l'elemento serie si è fermato vuol dire che su tutte e 2 le condizioni ho la condizione tetanica quindi ho S_0 in uno ed S_0 nell'altro però la differenza di tensione finale che vedo è $S_0 + P_0$ in un caso quindi la lunghezza che aveva l'elemento parallelo che era più lungo, alla fine io ho sul ramo serie ho sempre S_0 però gli sommo P_1 dove l'elemento parallelo ha la molla più corta quindi ce ne è un po' di meno.

Quindi questo gap è dovuto esclusivamente dall'elemento parallelo.

Io ho prima P_0 poi P_1 perché ho 2 lunghezze diverse, comunque è un elemento elastico per cui ho quell'andamento a gradino, ho un delta piccolo di quella dinamica che è un salto dovuto sicuramente a P_1 però in realtà quello lì è costante non si vede, quello che importa è il salto che ha fatto l'altro perché comunque di quella dinamica in tutti i modi sul parallelo lo vedrò alla fine il parallelo ha subito la discontinuità passa da P_0 a P_1 come tensione sviluppata (questo è assodato) però in tutti i modi sul ramo serie è comunque S_0 che si sobbarca tutto l'accorciamento, tutti i 2 rami si accorciano della stessa quantità, sul ramo parallelo io passo da P_0 a P_1 (finita la storia) sull'altro l'elemento serie fa quello ce abbiamo detto (si sobbarca tutto) quindi la dinamica è identica, se noi avessimo considerato soltanto il ramo serie quanto concerne la dinamica è uguale identica ciò che vediamo di diverso è la condizione a regime perché se avessimo avuto veramente solo il ramo serie saremmo tornati allo stesso livello di tensione invece sperimentalmente quello che si vede è che si arriva ad un livello di tensione leggermente più basso, se avessi avuto solo il ramo serie questa cosa non doveva succedere se non uscivo dalle modalità di funzionamento per cui il parametro di tensione tetanica non cambiava.