

Fisica degli Sport Lezione 10:

Forza e Potenza dei Muscoli

Aggiornata al 25/4/1999

Come funzionano i muscoli

A livello microscopico, i muscoli sono costituiti da numerose cellule di forma cilindrica chiamate fibre muscolari. Queste fibre hanno un diametro di ~50-100 nanometri (10^{-9} m) e sono lunghe parecchi centimetri. Un muscolo scheletrico tipico consiste di vari fasci di tali fibre sistemati parallelamente alla lunghezza del muscolo. Un minimo impulso elettrico da una cellula nervosa collegata alla fibra muscolare la farà contrarre. (Per ulteriori dettagli sul funzionamento delle fibre muscolari vedere [Reviews of Modern Physics, Vol. 69, No. 4, pg. 1269 \(1997\)](#) .)

Il segnale nervoso produce uno “spasmo”. Uno spasmo è una breve contrazione seguita da un rilassamento della fibra muscolare che dura tra 10 e qualche centinaia di millisecondi, a seconda del tipo di muscolo. Se arriva un nuovo segnale nervoso prima che il precedente spasmo sia terminato, si produrrà una contrazione più forte. Impulsi nervosi ad alta frequenza possono produrre una forza circa 3,5 volte superiore a quella prodotta da un singolo spasmo. Ciascun segnale di spasmo sarà trasmesso simultaneamente ad un numero di fibre muscolari compreso tra 5 e parecchie centinaia. I muscoli che controllano movimenti accurati e precisi avranno un numero minore di fibre per nervo (per esempio, i muscoli del bulbo oculare). La combinazione di una cellula nervosa con le fibre muscolari alle quali è attaccata è chiamata unità motoria. Inizialmente, quando un muscolo riceve un segnale per contrarsi rispondono solo poche unità motorie. In seguito, se è necessaria altra forza, si aggiungono sempre più unità motorie finché non si raggiunge la forza massima. Un muscolo scheletrico tipico possiede circa 300 unità motorie.

Per produrre una contrazione prolungata con una forza costante i nervi devono fornire una rapida serie di segnali di spasmo in modo tale che i singoli spasmi si sommino e si sovrappongano. Per cui, quando si tiene un oggetto in una posizione costante, le fibre muscolari si contraggono e si rilassano ripetutamente in risposta ad una raffica continua di impulsi nervosi. Ciascuno spasmo genera del calore e prodotti di scarto; ecco perché ci si stanca anche se non si compie lavoro in senso fisico.

Ci sono principalmente due tipi di fibre muscolari: a “spasmo rapido” e a “spasmo lento”. Come sottintendono i nomi, le fibre a spasmo rapido rispondono più velocemente con contrazioni più forti, ma di breve durata. Le fibre a spasmo lento sono più lente alla risposta e producono forze più piccole, ma esse sono applicate per periodi di tempo più

lunghe. Inoltre, le fibre a spasmo rapido tendono ad affaticarsi più velocemente rispetto a quelle a spasmo lento. La maggior parte dei muscoli contiene un'unione di entrambi i tipi di fibre, con l'esatta combinazione determinata dalla funzione del muscolo. Le fibre a spasmo rapido predominano nei muscoli impiegati per produrre sforzi brevi ma intensi, mentre le fibre a spasmo lento sono più comuni nei muscoli in cui è più importante la resistenza.

Le fibre a spasmo lento tendono a avere un colore più scuro di quelle a spasmo rapido; dipende da questo la predominanza di carne scura o bianca in diversi tipi di volatili. Gli uccelli migratori come le anatre e le oche hanno bisogno di muscoli ad alta resistenza per percorrere lunghe distanze in volo. Quindi, questi uccelli tendono ad avere una proporzione maggiore di carne scura rispetto a polli e tacchini.

La Legge dei Muscoli

La forza esercitata da un muscolo dipende dal numero di fibre muscolari attivate. Comunque, il numero di fibre muscolari è fissato dalla nascita; perché alcune persone sono più forti di altre? La forza di una singola fibra muscolare dipende dal suo diametro; più questo è grande, più la fibra è forte. Per cui, Arnold Schwarzenegger non ha più fibre muscolari degli altri... le sue sono semplicemente più grandi.

Tale consapevolezza ci porta alla Legge dei Muscoli:

La forza che un muscolo può produrre dipende solo dall'area della sezione trasversale del muscolo, non dalla sua lunghezza

La Legge dei Muscoli applicata agli esseri umani dà come risultato che i muscoli possono produrre tra i 30 e i 100 Newton di forza per ogni centimetro quadrato di area della sezione trasversale, senza considerare la lunghezza. Un valore tipico per la maggior parte dei muscoli responsabili del movimento è di $\sim 40 \text{ N/cm}^2$.

Cosa implica la Legge dei Muscoli e come possiamo dimostrarla? La Legge dei Muscoli afferma che la forza di un muscolo è proporzionale ad un'area, ovvero una lunghezza al quadrato. La massa (o il peso) di un muscolo dipende dal suo volume, ovvero una lunghezza al cubo. Quindi, la forza dovrebbe essere proporzionale al peso elevato a $2/3$, come mostrato sotto.

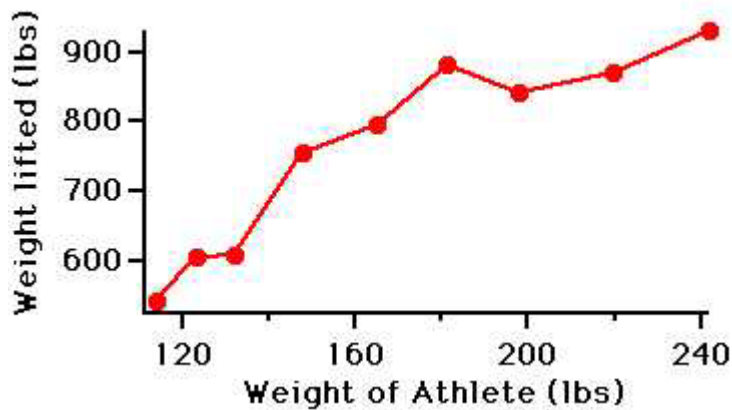
$$F \sim L^2$$

$$\text{peso} \sim L^3 \text{ ---> } L \sim \text{peso}^{1/3}$$

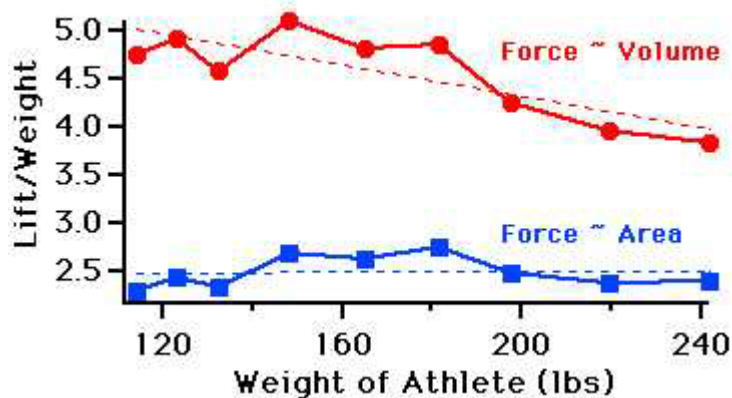
$$F \sim \text{peso}^{2/3}$$

Possiamo dimostrare questa ipotesi usando i dati relativi al sollevamento pesi, lo sport che fa maggior affidamento sulla forza muscolare. Sotto viene riportato un grafico dei sollevamenti del record mondiale come funzione del peso del sollevatore. Potete vedere a

occhio che non è assolutamente lineare, il che sta ad indicare che la forza non è solo proporzionale al peso.



Per dimostrare la Legge dei Muscoli possiamo dividere il peso sollevato (cioè la forza) per il peso dell'atleta elevato a $2/3$. Se la Legge dei Muscoli è corretta, il risultato dovrebbe essere una costante, il cui grafico è una retta orizzontale. Il risultato viene mostrato sotto, insieme all'ipotesi che la forza sia proporzionale al peso.



I dati in rosso (cerchi) mostrano il peso sollevato diviso per il peso del sollevatore. Se il grafico fosse una retta orizzontale indicherebbe che la forza di un muscolo è effettivamente proporzionale al suo volume e la Legge dei Muscoli sarebbe errata. Tuttavia non è una retta orizzontale, come mostra chiaramente il grafico che meglio rappresenta i dati (linea tratteggiata).

I dati in blu (quadrati) mostrano il peso sollevato diviso per il peso dell'atleta elevato a $2/3$, in accordo alla Legge dei Muscoli. Il grafico che meglio rappresenta questi dati (linea tratteggiata) è proprio orizzontale. Ciò sta ad indicare che, per i migliori atleti, la forza muscolare è proporzionale all'area, in accordo alla Legge dei Muscoli.

Ulteriori considerazioni sulla forza

La quantità di forza che può fornire un muscolo dipende dalla situazione. Se un muscolo viene allungato (da un altro muscolo o da una forza esterna) può esercitare una forza subendo una *contrazione eccentrica*. A ciò si contrappone la *contrazione concentrica*, che

definisce la situazione normale, in cui il muscolo esercita una forza contraendosi. La terza possibilità è la *contrazione statica*, nella quale il muscolo esercita una forza senza modificare la sua lunghezza.

Ecco alcuni esempi da illustrare. Prima di tutto, immaginate di stare a testa all'ingiù grazie ad un paio di stivali magnetici, con le braccia stese lungo i fianchi. Tenete un bilanciere nelle mani e cominciate ad abbassarlo lentamente verso il viso. Non appena eseguite questo movimento, i vostri muscoli tricipiti si allungano sempre di più, e nonostante ciò svolgono un contributo essenziale per sostenere il peso. Questo è un esempio di contrazione eccentrica. Gli altri due tipi di contrazione sono più comuni e più facili da immaginare. Adesso toglietevi gli stivali e rigiratevi in modo da ritrovarvi in piedi. Prendete il bilanciere ed eseguite un sollevamento standard. In questo caso i vostri bicipiti sollevano il peso contraendosi: questa è una contrazione concentrica. Infine smettete di sollevare e mantenete il bilanciere saldamente di fronte a voi: questa è una contrazione statica. Da questo viene fuori che la maggior parte dei muscoli può esercitare la sua forza massima nella contrazione eccentrica. Ecco perché un ampio *backswing* è così importante nella battuta del tennis, del golf, del baseball, *etc*; stendendo i muscoli in una posizione di contrazione eccentrica è possibile ottenere il massimo della loro forza. Se un muscolo è steso di ~20% in più della sua lunghezza a riposo, sarà in grado di esercitare circa il 15% in più di tensione. La tensione extra insieme alla maggiore lunghezza si tradurrà in un incremento del lavoro di circa il 30%. Tuttavia il tempo impiegato a stendere il muscolo deve essere breve o se ne perde l'effetto: quando una giocatrice di golf carica il tiro non resta con la mazza da golf sollevata.

I muscoli di solito si possono contrarre fino a ~50% della loro lunghezza a riposo. La velocità a cui ciò avviene varia enormemente da muscolo a muscolo (e da specie a specie). I muscoli delle zampe dei topi si possono contrarre più o meno di 20 lunghezze/secondo mentre i muscoli delle tartarughe possono contrarsi solo di 2 lunghezze/secondo. I muscoli umani in genere si collocano nel raggio delle 4-5 lunghezze/secondo; siamo più vicini alle tartarughe che ai topi.

La forza che un muscolo può generare dipende dalla velocità di contrazione; più veloce è la contrazione, minore è la forza prodotta. Quindi la forza massima si produce a velocità zero, cioè quando il muscolo è immobile. Questo non è molto utile per generare movimento. Il miglior compromesso sembra essere ad una velocità di circa 1/3 della velocità massima possibile. Sebbene ciò non permetta di ottenere il massimo della forza, rende massima la potenza sviluppata dal muscolo, come discusso sotto.

Potenza muscolare

Nel linguaggio di tutti i giorni la potenza viene spesso confusa con l'energia (almeno quando non si sta parlando di una potenza politica *etc*). Le due sono collegate, ma non sono la stessa cosa. Fondamentalmente la potenza è la variazione temporale dell'energia:

$$P = DE / Dt$$

Siccome sappiamo che il lavoro = $FD d = DE$, possiamo scrivere la seguente utile relazione:

$$P = DE / Dt = FDd / Dt = Fv$$

la potenza è una forza moltiplicata per una velocità.

Diversamente da quanto accade per gran parte delle altre grandezze di cui abbiamo discusso, le unità di misura della potenza vi sono familiari. Dall'equazione sopra emerge chiaramente che la potenza dovrebbe essere misurata in unità di energia/tempo; infatti 1 joule/secondo = 1 watt. Un'altra unità di misura familiare della potenza è il cavallo-vapore: 746 watt = 1 cavallo-vapore.

Una questione interessante nell'analisi dei movimenti negli sport è: qual è la densità di potenza di un muscolo? In altre parole, "quanto muscolo" serve per produrre una data quantità di potenza? Possiamo determinarlo usando le informazioni sui muscoli date sopra; abbiamo solo bisogno di stare un po' attenti alle unità di misura. La forza/area per un muscolo è

$$F/A \sim 40 \text{ N/cm}^2 = 400.000 \text{ N/m}^2$$

$$F \sim 400.000A \text{ (N)}$$

dove A è l'area della sezione trasversale del muscolo espressa in m^2 .

La potenza sviluppata dal muscolo sarà tale forza moltiplicata per la velocità. Una velocità massima tipica per i muscoli umani è 4 lunghezze/secondo, ma la potenza massima viene ottenuta ad 1/3 della velocità massima. Dunque assumeremo che la velocità sia $L \text{ m/s}$ (arrotondando per semplicità), dove L è la lunghezza del muscolo (in metri).

$$P = Fv \sim 400.000AL \text{ (W)}$$

Adesso vogliamo porre questo in relazione con la massa. La massa di un muscolo è il suo volume moltiplicato per la sua densità (r). La densità di un muscolo – in realtà la densità dell'intero corpo umano – è praticamente la stessa dell'acqua: 1 g/cm^3 , ovvero 1000 kg/m^3 . Quindi la massa sarà data da

$$M = rV \sim rAL = 1.000AL \text{ (kg)}$$

dove V è il volume del muscolo.

Combinando questi risultati arriviamo al nostro obiettivo: stabilire la potenza sviluppata per chilogrammo di muscolo:

$$P \sim 400.000AL \text{ (W)}$$

$$M \sim 1.000AL \text{ (kg)}$$

$$P/M \sim 400 \text{ W/kg}$$

Tale risultato è una buona stima approssimativa; la prestazione effettiva varierà di circa il 50%. Ma per calcoli veloci, se si assume che ogni chilogrammo di muscolo può produrre 400 watt di potenza, non si dovrebbe essere troppo lontani.

Lezione 10

RIEPILOGO SUI MUSCOLI:

- Le fibre a spasmo rapido rispondono più velocemente e con più forza, mentre le fibre a spasmo lento hanno più resistenza.
- La forza che un muscolo può esercitare è proporzionale all'area della sua sezione trasversale; negli esseri umani la costante di proporzionalità è $\sim 40 \text{ N/cm}^2$.
- La forza massima viene prodotta nella contrazione eccentrica.
- La velocità di contrazione massima è di 4-5 lunghezze/secondo.
- La potenza massima viene raggiunta ad $1/3$ della velocità massima.
- I muscoli si possono contrarre di circa il 50% della loro lunghezza a riposo.
- 1 kg di muscolo può sviluppare una potenza di circa 400 W.

Lezione 11

ANTEPRIMA:

Applicheremo alle situazioni sportive ciò che abbiamo appreso riguardo la potenza sviluppata dai muscoli.