

ANALISI MECCANICA DELLA CONTRAZIONE COME ELEMENTO BASE DELL'IPERTROFIA MUSCOLARE

Roberto Tarullo, *Insegnante dell'ISEF di Perugia*

Biomeccanica muscolare

I movimenti volontari del corpo umano sono organizzati dal sistema nervoso centrale, che ne determina tutti i parametri in relazione ai vari elementi sia interni che esterni.

Esso, al fine di rispondere a tali sollecitazioni in maniera corretta, fa adattare la muscolatura a differenti aspetti della sua attività.

Questo fatto conduce quindi a considerare i diversi tipi di intervento muscolare ed il loro adattamento in funzione dell'attività esercitata.

Mi sembra ora interessante esporre una classificazione dell'azione muscolare.

Questa classificazione si può fare o in funzione del modo in cui i muscoli si contraggono, oppure basandosi sul tipo di intervento nel movimento.

1) Secondo il modo di contrazione.

È necessario fare una prima distinzione tra le diverse contrazioni muscolari: quelle che portano al movimento e quelle che non portano al movimento.

Le prime sono dette isotoniche, le seconde sono chiamate isometriche e sono caratterizzate da posizioni in cui la forza muscolare (F_m) equilibria la resistenza (R).

Le contrazioni isotoniche possono essere di due tipi: quando la forza muscolare vince la resistenza esterna con conseguente accorciamento del ventre muscolare ed allungamento dei tendini, si parla di contrazione concentrica; quando si assiste al fenomeno inverso, ossia la resistenza esterna vince la forza del muscolo, si parla di contrazione eccentrica.

Queste nozioni possono riassumersi nella seguente tabella:

<i>Tipo di contrazione</i>	<i>Rapporto di forze</i>	<i>Tipo di lavoro</i>
A) Isometrica	$F_m = R$	Lavoro muscolare statico Es.: Mantenere l'avambraccio a 90° con manubrio
B) Isotonica	$F_m > R$ $F_m < R$	Dinamica positiva Dinamica negativa

È importante a questo punto sottolineare il fatto che la fisiologia parla di lavoro sia in contrazione statica (isometrica), sia in contrazione dinamica (isotonica).

Per quanto riguarda il presente argomento di trattazione, è necessario ricordare che in fisica la risultante del lavoro è data da un prodotto della forza per lo spostamento, non basta cioè effettuare una sola contrazione senza che questa segua un movimento.

Il lavoro è detto dinamico positivo quando la forza muscolare (F_m) supera una determinata resistenza esterna (R); nel caso che la resistenza esterna sia superiore alla forza muscolare, diciamo che il lavoro è dinamico negativo.

2) Secondo l'intervento muscolare.

Propongo qui una classificazione dei muscoli secondo la loro funzione nel movimento, cioè in agonisti, antagonisti, neutralizzatori e fissatori.

L'agonista è il muscolo che effettua il movimento come il quadricipite nell'estensione della gamba sulla coscia (per quanto riguarda il discorso precedente, questi muscoli provocano un lavoro dinamico positivo con contrazione isotonica concentrica).

L'antagonista è il muscolo che effettua il movimento inverso al precedente; così, nell'esempio precedentemente citato, il bicipite femorale sarà l'antagonista del movimento di estensione delle gambe.

Il neutralizzatore può essere considerato come il muscolo che neutralizza un altro muscolo o la componente di un altro muscolo la cui azione non è desiderata nel movimento. Così, nella flessione avanti ed indietro della testa, le componenti di rotazione del lato opposto degli sternocleidomastoidei si neutralizzano tra di loro.

Il fissatore interverrà per partecipare all'immobilizzazione di certi segmenti. Così, nel bilanciamento degli arti tesi, il tricipite giocherà un ruolo di fissatore al livello dell'articolazione del gomito.

È certo che un muscolo non interviene mai da solo in un movimento, ma si va ad associare a dei muscoli vicini al fine

di realizzare dei sinergismi muscolari. Si parlerà pertanto di gruppi muscolari agonisti, antagonisti, neutralizzatori ed infine fissatori.

Mi sembra evidente che tutti i muscoli in seno allo stesso gruppo, agonista per esempio, non interverranno con la stessa efficacia e potenza e sarà dunque dallo studio di un movimento che si apprende il valore funzionale di ciascuno dei muscoli facenti parte di un gruppo (sinergia) e si stabilisce così una classificazione funzionale di queste differenti unità.

Adattamento funzionale dei muscoli

La struttura funzionale è data dall'adattamento dei muscoli al movimento da effettuare.

Ciò è stato dimostrato fin dall'inizio del secolo (De Moor, 1903). Questo autore, dopo aver resecato il calcagno di un coniglio raccorciando così il braccio di leva di cui disponeva il gastrocnemio, ha osservato una ipertrofia di questo muscolo che si è adattato alle nuove condizioni divenute sfavorevoli ed ha così compensato questa diminuzione del braccio di leva con un accrescimento della forza muscolare.

Si sa d'altra parte che i muscoli fusiformi sono meglio adatti ai movimenti rapidi che non i muscoli penniformi che sono più adatti ai movimenti che richiedono una grande forza.

In effetti si suppone generalmente che le contrazioni statiche o concentriche, lente e potenti, sviluppano dei muscoli potenti, ma più lenti.

Al contrario, le contrazioni dinamiche rapide, di intensità relativamente debole, aumentano l'elasticità e la rapidità dei muscoli.

È evidente per esempio che la muscolatura di un sollevatore di pesi, abituata a movimenti lenti e potenti, differisce in modo notevole da quella di un tennista, in cui gli elementi di velocità ed elasticità saranno ricercati allo scopo di migliorare l'efficacia dei movimenti.

Non è che le caratteristiche dell'elemento contrattile si adattino funzional-

mente, ma la pratica dei movimenti di estensione (ampiezza) variabile permette di agire sulla lunghezza relativa del muscolo e dei tendini.

È possibile sottoporre il muscolo a quattro tipi di attività che svilupperanno gli insiemi muscolo-tendinei in modo differente:

1) Il lavoro in contrazione ed in stiramento di ampiezza completa aumenta l'ampiezza del movimento e sviluppa la lunghezza della parte contrattile rispetto a quella dei tendini.

2) La contrazione incompleta, combinata ad uno stiramento completo, porta ad un aumento della lunghezza totale del muscolo, ma ad una diminuzione della lunghezza delle fibre muscolari.

3) La contrazione completa e lo stiramento incompleto favoriscono i muscoli più corti con una diminuzione delle lunghezze degli elementi contrattili.

4) Infine, la contrazione e lo stiramento incompleto conducono ad una diminuzione della lunghezza delle fibre muscolari che le fibre tendinee non giungono a compensare.

Queste considerazioni sull'adattamento funzionale dei muscoli devono permettere all'educatore fisico di tener presente quella che Dehonx ha chiamato «la missione» di ciascun muscolo.

Proprietà meccaniche

Certe proprietà meccaniche del muscolo presentano un interesse particolare all'analisi del movimento.

Questa è la ragione per la quale mi propongo di esaminare qui quali nozioni interessano lo stato attivo, la gradualità delle contrazioni, l'elasticità.

La gradualità delle contrazioni

L'intensità meccanica, sviluppata dall'attività muscolare da un uomo che esegue un movimento, può essere adattata e graduata per mezzo di due fenomeni.

In effetti, il sistema nervoso può reclutare un numero più o meno grande di unità motorie e richiedere così al muscolo di produrre una forza più o meno gran-

de; si parlerà così di somma nello spazio.

Ma il sistema nervoso può ugualmente graduare lo sforzo inviando delle scariche motorie con delle frequenze variabili; si parlerà in questo caso di somma nel tempo.

Il sistema nervoso può così giocare su questi due tipi di somme al fine di graduare il riposo muscolare.

Tuttavia, se le variazioni di frequenza delle scariche possono modulare lo sforzo sviluppato, per quanto esso sia relativamente debole, è soprattutto per mezzo del reclutamento di unità motrici sempre più grande che il muscolo raggiungerà la sua piena potenza.

Si sa, in effetti, che la frequenza della scarica di un motoneurone è relativamente limitata e non supera le 50 al secondo, essendo dotato di un sistema di autoregolazione sostenuto per mezzo dell'anello Renshaw e l'esistenza di un potenziale positivo tardivo. Questa frequenza particolare di 50 al secondo la ritroviamo nelle registrazioni elettromiografiche di intensità elevata ed è conosciuta sotto il nome di ritmo di Piper.

Elasticità e componente elastica

Concetto di elasticità: un corpo, se vengono ridotte a zero le forze esterne che lo sollecitano, tende più o meno a riprendere la sua forma iniziale (ossia la forma che possedeva prima dell'applicazione delle forze esterne) a seconda della sua elasticità. Se il corpo riprende esattamente la forma primitiva, esso è perfettamente elastico.

L'elasticità dipende dalla temperatura e, in misura poco sensibile, anche dal tempo; ecco uno dei tanti motivi del riscaldamento muscolare prima di un esercizio fisico intenso.

Se nel corpo si produce una deformazione residua permanente, si raggiunge uno stato di plasticità (per quanto riguarda il muscolo prende il nome di stiramento).

La deformazione totale si compone in tal caso di una deformazione che scompare allo scomparire del carico (elasticità).

La deformazione permanente varia sensibilmente con il tempo.

La deformazione elastica per certi corpi, muscoli compresi, entro certi limiti (detti di proporzionalità) è proporzionale al carico; la deformazione permanente, entro i limiti di elasticità, è inapprezzabile e quindi trascurabile.

Tale proprietà, più propriamente detta elasticità di trazione, è rappresentata dal fatto che un muscolo, su cui viene ad agire una forza che lo sollecita alla distensione, al cessare di questa, riprende entro certi limiti la sua primitiva lunghezza. In ultima analisi, si comporta come un elastico perfetto.

Tuttavia, il grado di elasticità del muscolo è modesto: il suo modulo di elasticità o modulo di Joung si aggira sui $E = 0,95$ con un carico di rottura $\sigma_r = 40 \text{ gr/mm}^2$.

Cercando di essere più chiari, per quanto riguarda il modulo di Joung, diremo che esso è basato sull'ipotesi (praticamente inverosimile) che un carico immaginario (P) abbia prodotto un allunga-

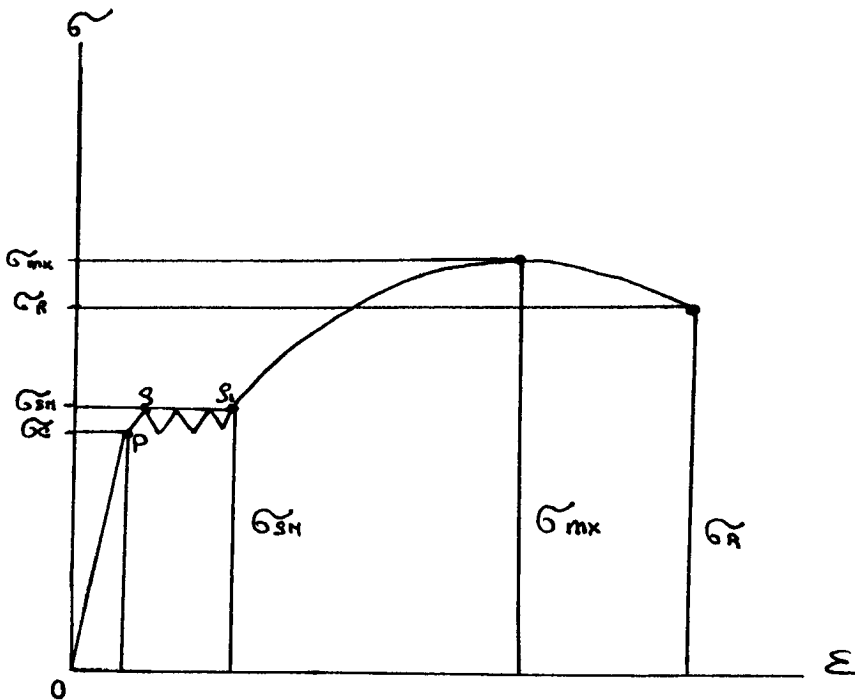
mento (λ) = (L) dove L è la lunghezza iniziale, senza però che si avveri la rottura; allora per $A = 1$ risulterebbe $E = P$; ossia rappresenterebbe il carico capace di raddoppiare la lunghezza primitiva del materiale in esame.

Per quanto riguarda la determinazione del modulo di Joung, diremo che $E = PL/A\lambda$ dove P è il carico, L la lunghezza iniziale, A la superficie della sezione trasversale, λ l'allungamento che è uguale a L .

Il carico di rottura σ_r , come già detto, è di 40 gr/mm^2 ; superato questo valore il muscolo va incontro a snervamento (stiramento), al quale farà seguito la rottura (strappo).

Per rendere più chiaro questo concetto, ci possiamo avvalere del grafico qui di seguito presentato.

Riportiamo in ordinate le tensioni σ (kg/cm) ed in ascisse le estensioni unitarie Σ che, secondo la legge di Hooke, risultano proporzionali alla sollecitazione fino a quando il σ rimane inferiore al σ_e ; si ottiene così una curva, come so-



pra rappresentata, che pone in evidenza il comportamento di un materiale sottoposto ad una forza di trazione crescente per gradi, a partire da zero fino al punto in cui avviene la rottura.

In P si ha il punto nel quale cessa la proporzionalità a cui corrisponde la tensione σ_e .

In S si ha il punto in cui comincia lo snervamento e a cui corrisponde la tensione σ_{SN} che è superiore al σ_e .

Nel periodo tra S e S', il materiale ha un comportamento affatto singolare e irregolare, oltre il quale gli allungamenti si rendono sempre più evidenti, fino a che non si ha la rottura che corrisponde al σ_R che è inferiore al σ_{mx} .

Per quanto riguarda il muscolo, possiamo dire che esso è caratterizzato da una elasticità che si mette facilmente in evidenza. Infatti, se si mette un carico ad una delle estremità, esso si allunga e la soppressione del carico gli permette di riprendere la lunghezza di partenza.

Se si sospende un carico ad un muscolo, esso si allunga in due fasi: la prima è tanto rapida, quanto la seconda è molto più lenta. Dopo la soppressione del carico il muscolo riprende la sua lunghezza di partenza in due fasi, una rapida e l'altra ammortizzata.

La tensione sviluppata da un muscolo non è la stessa durante l'allungamento progressivo per aumento del carico e l'accorciamento progressivo per diminuzione di questo carico. In effetti, per la stessa lunghezza del muscolo, la tensione durante l'allungamento è più elevata che durante l'accorciamento.

Questo fenomeno è dovuto al fatto che il tessuto muscolare non è omogeneo ed i suoi componenti hanno elasticità differente.

Hill (1949) ha paragonato il muscolo ad un sistema a due elementi: un elemento contrattile, situato a livello delle miofibrille, e un elemento elastico.

L'elasticità del muscolo gioca un ruolo importante per quel che riguarda l'ammortizzazione delle tensioni troppo brutali, dovute ad accorciamento e ad allungamento muscolare.

Essa dunque funge da protezione delle leve ossee alle inserzioni, ai legamenti ed ai tendini.

D'altra parte, nella contrazione delle miofibrille, si accumula energia potenziale, come in una molla. Questa energia è restituita in seguito con un certo ritardo.

C'è, in effetti, una grande differenza di tempo tra l'attivazione delle miofibrille e la durata della registrazione miografica.

Somma di contrazione

Lo stimolo di un nervo motore di un muscolo o del muscolo stesso, per mezzo di uno choc elettrico dopo il fissaggio di questo muscolo ad un apparecchio di registrazione meccanico (miografo), dà, come risposta, un balzo.

La risposta è caratterizzata da una fase di salita o di contrazione, un culmine, e una fase esponenziale di discesa o fase di relazione. Questa fase sopraggiunge con un certo ritardo a causa del fenomeno elettrico di depolarizzazione; questo è il periodo di latenza meccanica che, in realtà, è un fenomeno molto complesso.

Quando un secondo stimolo è applicato al muscolo prima della relazione completa, la seconda contrazione inizia ad un livello più elevato del suo apice e dura più a lungo.

L'avvicinarsi degli stimoli permette una fusione sempre più perfetta delle due risposte, finché la seconda cade nel periodo refrattario della prima risposta.

È importante sottolineare il fatto che le risposte meccaniche possono sommarsi.

La ripartizione di una serie di stimoli permette di raggiungere uno stadio (piattaforma tetanica) tanto più elevato e più regolare quanto più la frequenza dello stimolo è elevata: è la contrazione tetanica o tetano.

Quando la fusione è perfetta, il tetano è perfetto e può raggiungere da 4 a 5 volte il valore del balzo isolato.

La frequenza degli stimoli necessari per riprodurre il tetano perfetto dipende 319

dalla velocità di contrazione del muscolo e può variare da 30 a 350 al secondo.

La graduazione fisiologica della contrazione volontaria è più complessa per il fatto che essa risulta allo stesso tempo un fenomeno di somma temporale e di somma spaziale, che è permesso in seguito ad un reclutamento più o meno grande di unità motrici. D'altra parte, queste unità motrici battono con un asincronismo caratteristico che permette alla contrazione, per quanto debole, di assuefarsi in modo regolare, senza le oscillazioni che caratterizzano il tetano imperfetto.

Parole chiave

Lavoro: in fisica il lavoro è dato dal prodotto della forza per uno spostamento.

Sinergia: azione simultanea di più muscoli o più organi che portano alla realizzazione di una funzione o di un movimento complesso.

Potenza: in fisica la potenza è data dal prodotto del lavoro nell'unità di tempo.

Neurone: unità morfologica del sistema nervoso che presenta un corpo cellulare, contenente un nucleo e dei prolungamenti formati da sottili ramificazioni (dendriti) e da una escrescenza detta cilindrase. Esso trasmette l'impulso nervoso simile ad una corrente elettrica.

Elettromiografo: strumento per la registrazione dei fenomeni elettrici che si svolgono in un muscolo durante la contrazione.

Miofibrille: unità elementare del muscolo con esili filamenti stipati tra loro che riempiono quasi tutto il citoplasma. Esaminate, presentano una successione regolare di segmenti molto rifrangenti e meno rifrangenti.

Quando la fibra è esaminata al microscopio a luce polarizzata, il contrasto delle bande trasversali si inverte: quelle rifrangenti e scure si dimostrano birifrangenti o anisotrope e perciò appaiono brillanti (bande A), mentre le bande poco colorabili sono isotrope e perciò scure (bande I). Ciascuna banda A presenta una zona centrale più chiara e meno birifrangente, denominata banda H, che appare attraversata nel mezzo da una sottile linea M più scura. Una linea scura trasversale, la linea Z, divide a metà la banda I.

Ciascun segmento di miofibrille che si estende tra due linee successive prende il nome di sarcomero, che è l'unità strutturale e funzionale delle miofibrille. Il sarcomero comprende perciò una banda A e metà di ciascuna delle due bande I contigue. Questa unità si ripete periodicamente.

Unità motoria: unità formata da fibre muscolari striate e fibre nervose tramite placca motrice. In ogni singolo muscolo sono presenti diverse unità, ognuna delle quali risponde alla legge del tutto e del niente. La stimolazione nervosa dell'unità motoria è seguita, nell'ordine, da un breve periodo di latenza, da un periodo di contrazione e da un periodo di rilassamento.

Indirizzo dell'Autore

Prof. Roberto Tarullo
Via Poggio, 8
62010 Mogliano MC

Bibliografia

1. HAIMAUT C.: *Introduction a la biomecanique. Presse Universitaires de Bruxelles*, 1971.
2. FORNI I., CAPPELLINI O.: *Compendio di meccanica articolare*. Ed. Urbino, 1974.
3. MALAVASI C.: *Vademecum per l'ingegnere costruttore meccanico*. XIV Ed. Hoepli, 1974.
4. OTTANI M.: *Corso di meccanica*, vol. 1°. «Meccanica generale», Ed. Padova Cedam, 1966.
5. MONESI V.: *Istologia*. Ed. Piccin, Padova 1977.
6. GHIRETTI F.: *Fisiologia generale e animale*. Ed. UTET, 1977.
7. WEISZ P.B.: *Zoologia I*. Ed. Zanichelli, 1983.