

Lo sfruttamento dell'energia elastica nei muscoli umani

Nicola Maffulli, Vittorino Testa, Giovanni Capasso, Francesco Maffulli

Department of Orthopaedic Surgery, University of Aberdeen Medical School

1° Istituto di Ortopedia, Università di Napoli Federico II, I facoltà di Medicina,

INTRODUZIONE

Quando i muscoli scheletrici si contraggono attivamente per produrre lavoro positivo, la produzione di energia meccanica è usata per superare la frizione intramuscolare ed aumentare l'energia cinetica del corpo in toto o in parte di esso (6). Spesso, la meccanica dell'esercizio implica che queste energie cinetiche potenziali create dal muscolo di una o più fasi del movimento sono sfruttate dagli stessi muscoli in altre fasi del movimento. In altri termini, i muscoli possono sia frenare che muovere il corpo (6).

Per frenare il corpo, i muscoli devono essere attivi e devono essere allungati da forze esterne. Questo tipo di contrazione muscolare viene spesso denominata *contrazione eccentrica*. In queste condizioni, i muscoli producono lavoro negativo. Durante la contrazione eccentrica, il muscolo assorbe energia meccanica durante la fase di allungamento. Tale energia è dissipata in calore, oppure è conservata dal muscolo stesso.

L'energia meccanica conservata può essere degradata in calore se il muscolo si rilassa, o può essere riutilizzata durante un seguente ciclo di accorciamento attivo del muscolo. In quest'ultimo caso, il lavoro positivo eseguito dal muscolo durante l'accorciamento potrebbe derivare:

- a) dalla trasformazione di energia chimica in lavoro meccanico da parte delle proteine contrattili del muscolo, e
- b) dalla liberazione dell'energia meccanica conservata precedentemente nel muscolo e nel tendine durante la fase di lavoro negativo.

L'applicazione pratica di questo concetto può essere esaminata dall'analisi biomeccanica del cammino e della corsa.

Ad ogni passo, l'energia gravitazionale potenziale è trasformata in energia cinetica quando il corpo si sbilancia in avanti. Viceversa, l'energia cinetica è trasformata in energia potenziale durante il processo di sollevamento del centro di gravità conseguente all'azione di muovere un passo.

La qualità di energia potenziale e cinetica del centro di gravità cambiano durante le differenti fasi del ciclo del passo (18). Durante il cammino, si assiste ad una continua alternanza di espressione fra energia cinetica ed energia potenziale.

L'azione muscolare per muovere il corpo ha luogo in due fasi del processo del muovere un passo. Nella prima fase, per fornire un'ulteriore spinta verso l'avanti, in una seconda fase per completare l'innalzamento del centro di gravità.

Durante la corsa, invece, l'energia cinetica e potenziale del baricentro del corpo aumentano e diminuiscono simultaneamente durante il passo. Dopo il periodo di volo, quando il piede prende contatto con il suolo, l'energia meccanica totale, costituita dall'energia potenziale e cinetica, diminuisce all'improvviso. Il suolo rigido induce una deformazione delle strutture corporee. In seguito a questa deformazione, l'energia meccanica deve essere dissipata in calore, o conservata in elementi elastici allungati. In questa fase, i muscoli sono contratti per controllare il movimento, e forzatamente allungati per eseguire lavoro

negativo. Immediatamente dopo questo allungamento, i muscoli si accorciano attivamente eseguendo lavoro positivo.

Tale analisi può essere estesa ad altre modalità di esercizio. Ad esempio, i lanci e i salti, in maniera simile alla corsa, sono particolarmente adatti all'immagazzinamento ed alla utilizzazione dell'energia meccanica dei muscoli.

La possibilità di immagazzinare ed utilizzare energia meccanica è presente quando la meccanica degli esercizi è tale da indurre i muscoli ad essere forzatamente allungati immediatamente prima di essere accorciati.

IMMAGAZZINAMENTO DELL'ENERGIA ELASTICA NELL'UOMO

Molti esperimenti sull'uomo (4,37) hanno dimostrato l'aumento dell'efficienza (misurata come rapporto fra lavoro eseguito ed energia consumata nell'esercizio di squat e nei salti) grazie all'effetto di potenziamento di una fase iniziale del movimento indotto da un preallungamento dei muscoli.

Il preallungamento è usato in molti sport che hanno il salto come momento principale ed è una maniera efficiente per saltare più in alto. Quando la relazione forza-velocità è misurata durante un movimento complesso che coinvolge molte articolazioni, come ad esempio, il salto verticale con contro-movimenti preparatori (che servono a preallungare il muscolo), il contro-movimento porta i muscoli estensori del ginocchio a produrre maggiore forza ad ogni velocità angolare delle ginocchia nella fase concentrica (12).

Aumentata forza, velocità e potenza implicano che l'efficienza meccanica del lavoro muscolare sarà aumentata. L'efficacia dei movimenti di preallungamento a produrre maggiore efficienza è stata rilevata in una serie di esperimenti che hanno studiato il processo di squatting e di salto (vedi seguito).

SQUAT E PREALLUNGAMENTO

Margaria et al. (34) osservarono che il piegamento delle ginocchia fino allo squat completo seguito dalla estensione delle gambe per ritornare alla stazione eretta è eseguito con minore spesa energetica se l'estensione segue immediatamente la flessione. Questa sequenza è detta *esercizio di rebound* o di *rimbalzo*.

Al contrario, se fra la flessione e l'estensione trascorre un certo intervallo di tempo (un secondo e mezzo), la prestazione è peggiore, ed il consumo di ossigeno notevolmente maggiore (1,88 litri · min⁻¹ e 1,52 litri · min⁻¹, rispettivamente). Questo fenomeno è stato interpretato come dovuto dal fatto che, nel primo caso, il lavoro negativo eseguito durante la flessione è trasformato parzialmente in energia elastica nei muscoli allungati e contratti dalla coscia.

Questa energia è utilizzata per l'esecuzione di lavoro positivo

nella fase di estensione. Dato che sia nei singoli squat con rimbalzo che in quelli senza rimbalzo il numero di flessioni ed estensioni per minuto era uguale, è stato assunto che il lavoro meccanico eseguito era lo stesso. L'efficienza dell'esercizio appariva quindi essere significativamente maggiore nel primo caso (34).

Un esperimento con caratteristiche simili fu eseguito da Thys et al. (37). L'esercizio avveniva su una piattaforma ergometrica, ed il consumo di ossigeno veniva accuratamente misurato. La velocità massima durante l'estensione risultò essere più alta ($1,45 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ contro $1,22 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$) ed il tempo di lavoro positivo inferiore (0,65 sec contro 0,55 sec) nell'esercizio senza rimbalzo. La forza esercitata dai piedi sulla piattaforma era superiore (250 Kg contro 150 Kg) e l'efficienza meccanica più alta (18,8% contro 25,8%) nell'esercizio con rimbalzo rispetto a quello senza rimbalzo. I risultati di questo esperimento sono pressoché uguali a quelli ottenuti da Margaria et al. (34).

Un analogo esperimento fu eseguito da Asmussen e Bonde-Petersen (4). L'efficienza apparente fu calcolata per entrambi i tipi di esercizi, e gli esperimenti furono eseguiti in ciascun soggetto in due serie. In una, il soggetto piegava le ginocchia fino alla posizione di squat profondo, ed una in cui piegava le ginocchia fino a circa 90° in posizione semi-squat. Al soggetto venne inizialmente richiesto di piegare le ginocchia con rimbalzo ed estenderle di nuovo. In seguito, doveva mantenere la posizione di squat per due secondi. Asmussen e Bonde-Petersen (4) dimostrarono che l'efficienza apparente nel lavoro con rimbalzo era di 39,4% con la posizione di squat profondo e di 41% con la posizione di semi-squat. L'efficienza apparente senza rimbalzo era di 21,9% e di 26,1%, rispettivamente. Egli attribuì la differente efficienza al riutilizzo dell'energia meccanica. Negli esercizi di rimbalzo, l'energia era temporaneamente conservata durante la fase negativa (o eccentrica), e riutilizzata nella fase positiva (o concentrica) che immediatamente seguiva. I risultati di questo esperimento suggerivano che l'energia veniva dissipata in calore durante l'intervallo tra il lavoro negativo e positivo introdotto quando il soggetto manteneva la posizione di squat profondo e di semisquat per due secondi.

SALTO E PREALLUNGAMENTO

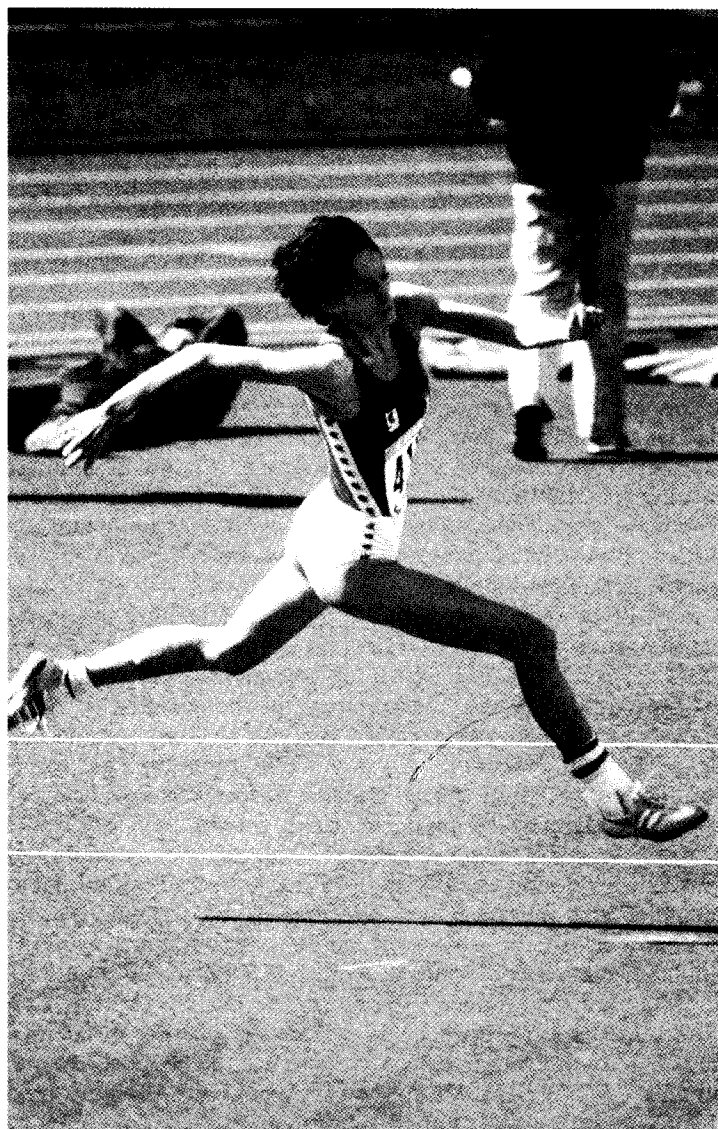
Il preallungamento è stato dimostrato essere utile per incrementare l'efficienza e la performance nei salti verticali. Thys et al. (36) dimostrarono una maggiore efficienza meccanica nel salto verticale con rimbalzo (54%) rispetto ai salti senza rimbalzo (20%). Questi Autori hanno suggerito che l'aumentata efficienza era dovuta al recupero dell'energia elastica che influenzava soprattutto la prima parte del lavoro positivo.

In seguito, Bosco et al. (14) hanno elaborato dati più oggettivi sul miglioramento della performance attraverso il preallungamento. Gli esperimenti eseguiti consistevano nella esecuzione di salti verticali massimali sulla piattaforma ergometrica da due diverse posizioni di partenza:

a) ai soggetti era richiesto di eseguire una flessione plantare massima da una posizione statica, con il tallone a pieno contatto con la piattaforma ergometrica. Questa condizione è denominata "salto con squat", ed era eseguita come una contrazione concentrica pura;

b) il salto secondo l'altra modalità era eseguito con il soggetto sulla punta dei piedi con un contro-movimento preliminare. In questo caso, i muscoli del polpaccio erano attivamente allungati prima che il lavoro concentrico incominciasse.

Per assicurarsi che l'azione venisse eseguita dai soli muscoli del polpaccio, sia l'articolazione del ginocchio che quella dell'anca erano immobilizzate in un tutore ortopedico.



L'ampiezza del movimento era registrata con un elettrogoniometro connesso all'articolazione della caviglia. L'elettrogoniometro registrò movimenti angolari con un range tra 28° e 75° . L'elettromiogramma (EMG) integrato dimostrò che l'attività mioelettrica dei muscoli del polpaccio era potenziata durante la fase concentrica nel salto con contro-movimento preliminare rispetto al salto senza contro-movimento.

Questo implicava un effetto neuronale oltre ad un meccanismo di conservazione dell'energia. Gli Autori hanno anche dimostrato che, in tutte le condizioni sperimentali, l'innalzamento del centro di gravità nel salto senza contro movimento (media $3 \pm 0,8$ cm.) era significativamente minore rispetto a quello del salto con contromovimento (media $3,9 \pm 1,2$ cm.).

La forza positiva media prodotta era maggiore nel salto con contro movimento (488 ± 130 Newton) rispetto a quello senza contromovimento (228 ± 47 Newton). La differenza nell'innalzamento del centro di gravità e la forza positiva media tra i due tipi di salti è in accordo con i risultati degli studi precedenti, e rafforza il concetto del ruolo della conservazione e riutilizzazione dell'energia elastica nel miglioramento della prestazione e dell'efficienza muscolare.

Bosco et al. (10, 11) attribuirono i miglioramenti riscontrati durante salto con contro-movimento all'effetto combinato del recupero dell'energia elastica e del potenziamento mioelettrico. Sebbene non sembri difficile attribuire il miglioramento della prestazione nel salto con contromovimento all'effetto combinato dell'attività mioelettrica e della restituzione dell'energia elastica, un compito ben più difficile è quantificare il contributo relativo dei due meccanismi.

Assumendo che la forza sviluppata durante il lavoro concentrico con contro-movimento sia correlata linearmente con l'attività dell'EMG integrato (8), è possibile separare l'effetto del potenziamento determinato dall'energia elastica rispetto a quello dato dal potenziamento mioelettrico.

Bosco et al. (10, 15) riportarono che approssimativamente il 72% e il 28% sono responsabili del potenziamento elastico e mioelettrico rispettivamente. Tale semplice relazione lineare fra forza muscolare sviluppata ed EMG integrato con è sempre ritrovata in tutti i muscoli (32). Bosco et al. (10) hanno anche studiato il contributo del lavoro prodotto dalla utilizzazione dell'energia elastica al lavoro positivo totale con differenti posizioni angolari.

L'ampiezza del movimento del ginocchio durante ciascuna prestazione di salto fu registrata con un elettrogoniometro posto sulla parte laterale del ginocchio del soggetto. Il contributo del lavoro dovuto alla distruzione dell'energia elastica ammontava a circa il 50% nei salti con piccoli movimenti angolari, mentre, in quelli con movimenti angolari più ampi, questa era sul 30%. In termini assoluti, il lavoro dovuto alla dissipazione dell'energia elastica era più alto nei salti di grande ampiezza. Ciò non di meno, l'efficienza più grande fu notata nei salti di più piccola ampiezza che, allo stesso tempo, erano caratterizzati da un basso EMG integrato durante la fase concentrica.

Una maggiore quantità di lavoro positivo era eseguita nei salti

di grande ampiezza utilizzando il contributo metabolico attivo del muscolo.

Questo può essere ricavato da una relazione lineare fra l'attività elettrica integrata ed il consumo di ossigeno (9). L'esatto meccanismo che contribuisce a diminuire l'attività elettromiografica durante il lavoro positivo nei salti di piccola ampiezza erano caratterizzati da una più grande velocità di allungamento e da un più breve tempo di accorciamento (il periodo di transizione tra lavoro positivo e negativo), e da maggiori forze medie istantanee sviluppate alla fine della fase eccentrica (10).

Bosco et al. (10) suggeriscono che l'attività dell'unità motoria dei muscoli estensori del ginocchio, misurata dall'EMG integrato, era submassimale nel salto con rimbalzo. Questo si verificava per qualsiasi tensione sviluppata.

Il suddetto rapporto tra EMG integrato e forza sviluppata suggerisce anche che, per sviluppare la stessa quantità di forza, è necessaria una minore attività mioelettrica nei salti con rimbalzo rispetto ai salti dalla posizione di massima accosciata. Bosco et al. (13) hanno studiato l'efficienza meccanica del lavoro positivo in soggetti che eseguirono salti verticali per un minuto, con rimbalzo e senza rimbalzo. Nell'esercizio con rimbalzo, la forza sviluppata all'inizio del lavoro positivo è già alta, mentre, nell'esercizio senza rimbalzo, la forza sale più lentamente, dato che la tensione sviluppata nei muscoli è trasmessa con un lieve ritardo, durante il quale i componenti elastici della serie sono allungati.

Quindi, il tempo richiesto per eseguire una data quantità di lavoro positivo è maggiore nel protocollo senza rimbalzo rispetto a quello con rimbalzo. Questa interpretazione era rafforzata dall'alta correlazione ritrovata tra il tempo per eseguire il lavoro positivo e l'efficienza meccanica misurata nel salto.

I suddetti esperimenti dimostrano che non c'è significativa differenza nel tempo di lavoro positivo tra squat con rimbalzo e senza. L'efficienza meccanica, calcolata nei salti senza rimbalzo, ammonta a 17,2%. Questo valore riflette solo la conversione dell'energia biochimica in lavoro meccanico, ed è più basso rispetto a quanto ritrovato nei salti con rimbalzo (27,8%). Queste differenze non possono essere spiegate completamente dal solo immagazzinamento dell'energia elastica che si verifica nel salto con rimbalzo. Negli esercizi di squat, la restituzione dell'energia elastica è stata dimostrata essere solo un quarto dell'energia totale immagazzinata (4). Il lavoro meccanico durante la fase positiva era significativamente maggiore nel salto con rimbalzo, mentre il consumo di ossigeno non era significativamente differente fra le due modalità di salto. Il fatto che l'energia elastica sia solo un quarto dell'energia totale immagazzinata indica che altri fattori possono entrare in gioco nello spiegare la differenza in efficienza tra i salti con rimbalzo e quelli senza. Tali fattori saranno trattati di seguito.

Il tempo più breve richiesto per eseguire lavoro positivo in un ciclo costituito da allungamento ed accorciamento rispetto ad un ciclo di allungamento e riposo potrebbe essere responsabile della migliore efficienza del lavoro di salto con rimbalzo.

L'efficienza meccanica calcolata per entrambe le modalità di

esercizio, ed estrapolata da esperimenti in cui si calcolava il costo dell'energia durante la corsa, dimostrava una significativa relazione parabolica con il tempo di esecuzione del lavoro positivo.

Una spiegazione di questo fenomeno può risiedere nei commenti di Asmussen e Sorensen (5) che sottolinearono come, all'inizio di una contrazione di forze esterne che causa una perdita di produzione di lavoro durante la prima parte del movimento. Ne consegue che, per eseguire una data quantità di lavoro positivo nei salti con rimbalzo e durante la corsa, il muscolo deve rimanere attivo per un tempo più breve rispetto ai salti senza rimbalzo, e che quindi meno energia chimica viene liberata.

Queste osservazioni concordano con il fatto che il tempo richiesto per eseguire lavoro positivo nei salti con rimbalzo (181 msec) e nella corsa (124 msec) era significativamente più breve rispetto al tempo necessario per eseguire dei salti senza rimbalzo (una media di 372 msec). L'efficienza meccanica della corsa (13), sia misurata che semplicemente estrapolata, era della stessa magnitudine di quella riportata da altri autori (19, 29, 35).

L'efficienza meccanica della corsa è molto più alta (dell'ordine del 50-70%) rispetto all'efficienza meccanica dei salti (26-42%) (4, 10, 37). La diversa efficienza meccanica tra corsa e salto non può essere attribuita alla differenza nel tasso di turnover dei lagami energetici della molecola di ATP. La velocità di accorciamento nei muscoli delle gambe in entrambe le attività era simile. La velocità media del ginocchio andava da 5,0 a 5,2 rad · sec⁻¹ ad una velocità di corsa di 3,33 m · sec⁻¹ (7) e da 4,5 a 5,5 rad · sec⁻¹ rispettivamente per i salti senza e con rimbalzo (10).

IMMAGAZZINAMENTO E RESTITUZIONE DELL'ENERGIA ELASTICA IN DIFFERENTI TIPI DI FIBRE MUSCOLARI NELL'UOMO

L'utilizzazione dell'energia elastica può derivare in maniera differenziata da fibre muscolari lente e veloci che posseggono differenti tempi di impegno dei lagami dell'ATP (15). L'ipotesi di partenza era che i soggetti con una differente composizione di fibre muscolari avrebbero eseguito una quantità di lavoro differente utilizzando dei salti verticali con contro-movimenti.

La differenza positiva di forza fra i salti con contro-movimento preliminare e quelli senza (risultanti in movimenti angolari del ginocchio simili nella fase concentrica) fu scelta come parametro per riflettere il potenziamento della forza da parte del pre-allungamento (11, 12).

Quando la differenza positiva nella forza media era calcolata per piccoli movimenti angolari del ginocchio, essa dimostrava una relazione positiva con la percentuale di fibre veloci. Quando lo stesso parametro meccanico era calcolato per più ampi movimenti angolari e graficato contro la distribuzione di

fibre, fu osservata una relazione negativa.

L'effetto di potenziamento notato per i piccoli e grandi movimenti angolari mostrava una relazione molto significativa con la forza sviluppata alla fine della fase di pre-allungamento nel salto con contro-movimento preliminare. Tale parametro nei piccoli movimenti angolari era significativamente correlato alla composizione in fibre, ma ciò non accadeva nei movimenti angolari più ampi.

I risultati indicavano che i soggetti il cui vasto laterale mostrava una maggiore percentuale di fibre veloci traevano maggior beneficio dalla fase di allungamento eseguita ad alta velocità e piccoli movimenti angolari. La quantità di energia elastica conservata in questa fase era di 30 e di 26 Newton · kg⁻¹ di peso corporeo, rispettivamente per i soggetti con maggiore percentuale di fibre veloci e quelli con elevate percentuali di fibre lente. La restituzione dell'energia elastica era proporzionale alla quantità di energia conservata nei salti di grande ampiezza dove il periodo di transizione tra allungamento ed accorciamento era più lungo.

In questo caso, entrambi i tipi di soggetti dimostravano una quantità simile di immagazzinamento di energia elastica (rispettivamente 17 e 16 N · kg⁻¹ di peso corporeo). L'uso di questa energia elastica era più grande nei soggetti a prevalenza di fibre lente (4%) rispetto a quello dei soggetti con prevalenza di fibre veloci (17%).

I risultati (15) possono essere spiegati con la differenza nell'emivita dei legami fra le fibre veloci e quelle lente. Queste ultime possono essere capaci di mantenere i suddetti legami per un periodo più lungo rispetto alle fibre veloci, e quindi possono utilizzare meglio l'energia elastica.

Fu così suggerito (15) che le fibre lente e quelle veloci sono caratterizzate da differenti proprietà visco-elastiche che permettono loro di trarre differenti benefici dal ciclo di allungamento-accorciamento a seconda che il movimento sia veloce o lento.

IMMAGAZZINAMENTO DELL'ENERGIA ELASTICA natura dell'elasticità del complesso muscolo-tendine

Il comportamento elastico del muscolo è direttamente correlato alla sua struttura. Il muscolo intatto consiste di due elementi: elementi contrattili ed elementi visco-elastici. Questi ultimi sono suddivisi in "componenti elastici in parallelo" e "componenti elastici in serie" (33), a seconda che queste strutture siano in parallelo od in serie con gli elementi contrattili del muscolo. Gli elementi elastici in parallelo sono composti da sarcolemma e tessuto connettivo, quali endomisio, perimisio ed epimisio. Questi circondano le singole fibre, i fascicoli ed il muscolo intero, rispettivamente, e probabilmente contribuiscono a fornire al muscolo la capacità di resistere alla tensione in allungamento.

Gli elementi elastici in serie sono di gran lunga più important

rispetto a quelli in parallelo per la conservazione dell'energia elastica. Quando il muscolo attivo è allungato, alcuni elementi elastici sono locati nei tendini (1). Una parte considerevole dell'elasticità degli elementi elastici in serie giace nei legami tra i filamenti di actina e di miosina. Secondo Huxley e Simmons (28), la testa dei filamenti di miosina è ruotata all'indietro durante l'allungamento, contro la loro tendenza naturale, fino alla posizione di più alta energia potenziale.

In questo modello, l'unità S2 della molecola di meromiosina pesante possiede elasticità. Giacché la durata del legame del muscolo di rana a 0° C è limitata a 30 msec (21), è vantaggioso per l'utilizzazione dell'energia elastica conservata che sia l'allungamento stesso che il periodo di transizione (per tempo di accoppiamento tra il ciclo di allungamento e di accorciamento) siano brevi.

Il tempo di legame nel muscolo dei mammiferi a 37° è considerevolmente più breve. Un maggiore tempo di allungamento causerebbe uno scivolamento del sarcomero (26) che implica il distacco dei legami. In questa maniera, il potenziale elastico dei rispettivi legami non sarà utilizzato (14). Un breve periodo di accorciamento, associato con breve preallungamento, preverrà il distacco dei legami ed indurrà una migliore utilizzazione della loro energia potenziale conservata durante la susseguente fase di accorciamento.

Questo può spiegare, almeno parzialmente, il dato che il potenziale di produzione di energia meccanica nel movimento di salto è più alto quando eseguito con un pre-allungamento breve range e tempo di accorciamento breve (11, 12).

TENDINI, OSSA E LEGAMENTI

I tendini servono a trasmettere la tensione sviluppata nel muscolo. Inoltre, essi sono importanti per la conservazione dell'energia elastica. Questa seconda funzione diventa più importante se la porzione di tendine nel complesso muscolo-tendine è grande.

Nei muscoli con fibre lunghe e tendini corti, la maggior parte dell'energia di stiramento è conservata nel muscolo. La maggior parte dell'energia è conservata nel tendine se esso è lungo e le fibre muscolari sono corte (il tendine di Achille nel tricipite della sura).

Le proprietà biomeccaniche dei tendini sono regolate da una specifica organizzazione macromolecolare e dalla loro matrice extracellulare che consiste quasi esclusivamente di collagene e proteoglicani. Si pensa che solo poche fibre di elastina entrino in gioco nel recupero della configurazione normale delle fibre di collagene dopo che il muscolo sia stato contratto o allungato. Gli elementi elastici in serie probabilmente risiedono nei tendini e nel fascicolo tendineo del muscolo.

Quando un muscolo contratto è allungato, questi elementi sono posti sotto tensione in maniera da resistere all'allungamento

con più grande forza.

Ker (30) ha eseguito una serie di misurazioni sulla perdita di energia nei tendini che erano allungati ed a cui era poi permesso di accorciarsi. Egli esaminò l'aumento di forza quando una porzione di tendine era allungato, e la caduta di forza quando il tendine era fatto riaccorciare. La perdita di energia media era intorno al 7% del lavoro inizialmente eseguito durante l'allungamento.

Quindi, il 93% dell'energia era restituita nel movimento di accorciamento elastico. Esperimenti di Ker et al. (31) hanno dimostrato l'importanza dell'energia elastica durante la corsa. I mammiferi superiori (incluso l'uomo) conservano gran parte dell'energia richiesta per la corsa grazie alle strutture elastiche dei loro piedi e delle gambe (2, 19).

Energia potenziale cinetica è conservata nella prima fase come energia elastica, e quindi restituita nella seconda fase. Tra le strutture elastiche coinvolte, i tendini dei muscoli della parte distale della gamba sono estremamente importanti (1, 2). Ker et al. (31) hanno anche dimostrato l'importanza delle proprietà elastiche dell'arco del piede umano. Esso è simile ad una molla, e può conservare abbastanza energia in modo da poterla risparmiare durante la corsa. L'energia conservata dipende dal carico applicato. Un carico di 6,4 KNewton sarebbe necessario per imitare il pattern di forze applicate in una corsa non veloce di 4,5 m · sec⁻¹. L'energia conservata nell'arco del piede sarebbe appena maggiore di 17 joules. Quindi, un uomo di 70 Kg. che corre alla velocità di 4,5 m · sec⁻¹ produce un'energia di circa 100 joules. Di questi, 17 joules sono conservati come energia negli elementi dell'arco del piede, 35 joules nel tendine di Achille, e sicuramente altra energia è conservata in altri tendini dell'arto inferiore. L'arco del piede conserva abbastanza energia da rendere il processo della corsa più efficiente da un punto di vista energetico.

MUSCOLI ISOLATI

Un miglioramento della prestazione meccanica del muscolo è stata descritta dagli anni '20 in poi (25, 27). Cavagna et al. (17) hanno fornito dati obiettivi sul miglioramento della prestazione attraverso il pre-allungamento in muscoli isolati. Gli esperimenti furono eseguiti sul muscolo gastrocnemio isolato di rana alla temperatura di 0,2°-0,6°C (17, 20). In questi esperimenti, i gastrocnemi isolati di rana erano stimolati massimalmente, ed era loro permesso di accorciarsi di una data distanza ad una velocità costante nelle seguenti condizioni:

- da uno stato di contrazione isometrica,
- dalla stessa lunghezza ma immediatamente dopo essere stati allungati a quella lunghezza mentre attivi.

Il lavoro positivo eseguito dal muscolo precedentemente allungato (W1) era più grande rispetto al lavoro positivo eseguito dallo stesso muscolo durante la fase di accorciamento da uno stato di contrazione isometrica (W). La velocità, la lunghezza e

la quantità di accorciamento erano gli stessi. Il lavoro positivo in entrambi i casi era misurato a differenti velocità di allungamento e accorciamento, nonché a differenti lunghezze medie del muscolo.

Il rapporto $W1 \cdot W^{-1}$ aumentava sia con la velocità che con la lunghezza fino ad un valore massimo di 2,5. Questo rapporto diminuiva se un intervallo di tempo era permesso tra allungamento ed accorciamento. Cavagna et al. (17) hanno dimostrato che un allungamento attivo del muscolo dopo un allungamento forzato permette l'esecuzione di una quantità di lavoro meccanico da 50% a 100% maggiore rispetto a quello che sarebbe stato possibile da una contrazione isometrica.

Quindi, è maggiore l'energia meccanica rilasciata in ciclo di allungamento-accorciamento. Quando il muscolo è forzatamente allungato durante la contrazione e poi mantenuto attivo a quella lunghezza di allungamento prima che la fase concentrica sia iniziata, la forza ottenuta durante l'allungamento decade gradualmente. Le modificazioni delle caratteristiche elastiche del muscolo indotte dall'allungamento hanno, quindi, un carattere transitorio, e tendono a scomparire col tempo dopo l'allungamento.

Cavagna e Citterio (16) hanno esaminato l'effetto dell'allungamento preliminare sulla velocità di accorciamento ed hanno ritrovato che la velocità di accorciamento è generalmente più grande per muscoli che siano stati precedentemente allungati.

Edman et al. (24) hanno pubblicato uno studio sulle maniere in cui il pre-allungamento modifica le curve di lunghezza-tensione e di forza velocità delle fibre muscolari isolate. In questi esperimenti, singole fibre del muscolo semitendinoso di rana erano allungate durante contrazioni tetaniche, e la tensione e la lunghezza dei sarcomeri registrate. La temperatura variava da 0,8° a 2,75°C. Fu dimostrato che, quando le fibre erano allungate durante la contrazione, una maggiore forza era registrata. La tensione aumentava rapidamente all'inizio, per poi rimanere costante od aumentare lentamente durante il resto del periodo di allungamento. La forza decadeva alla fine dell'allungamento ma rimaneva più alta rispetto alla forza registrata in una contrazione isometrica di controllo. Edman confermò questi risultati nelle fibre singole, ma dimostrando che il fenomeno non è dovuto ad una non uniformità tra le fibre nel muscolo in toto (24).

POSSIBILI CAUSE PER IL MIGLIORAMENTO DELLA PERFORMANCE NEL CICLO DI ALLUNGAMENTO E ACCORCIAMENTO

Attività muscolari forzate sono eseguite con maggiore efficienza quando precedute da un contromovimento in cui il muscolo attivo è allungato dai suoi antagonisti o da una forza esterna. Esempi sono calciare, dare un pugno, saltare nella posizione all'impiedi, ed il servizio nel tennis. Quindi, l'allungamento preliminare modifica le caratteristiche elastiche del muscolo contratto, nel senso che più energia elastica può essere rilasciata.

Se un muscolo è rilasciato dopo essere stato allungato mentre è attivo, esso può eseguire più lavoro su carichi che non potrebbe affatto sollevare se rilasciato durante una contrazione isometrica (16). Questo potrebbe essere dovuto a due fattori:

- a) una più grande o più efficiente mobilitazione dell'energia chimica dai componenti contrattili in seguito a preallungamento (ad esempio, potrebbero essere mobilitati un maggior numero di siti attivi nell'interazione tra actina e miosina);
- b) il recupero degli elementi viscoelastici allungati che ha luogo quando la tensione nel muscolo è all'improvviso ridotta, dagli alti valori ottenuti durante l'allungamento, ad un carico minore (16).

Fattori intramuscolari possono essere alla base della conservazione di energia in preparazioni isolate di muscoli intatti in sito, mentre altri fattori possono anch'essi giocare un ruolo di attività di allungamento-accorciamento:

- a) l'allungamento maggiore del muscolo avviene nella fase concentrica dell'esercizio, con relativamente bassa attività elettromiografica nella fase di lavoro negativo. Probabilmente, questo è dovuto al fatto che l'allungamento del muscolo nella fase eccentrica deve attivare i fusi muscolari. È stato evidenziato che l'attività mioelettrica degli estensori della gamba potrebbe essere potenziata durante la fase di contatto del ciclo della corsa (23). Per esempio, il pattern di attività del gastrocnemio e del tibiale anteriore durante la corsa dimostra che l'EMG comincia 120-180 msec prima del contatto con il suolo, ma aumenta fortemente nella breve fase di allungamento muscolare dopo il contatto con la piattaforma. Con l'inizio della estensione del piede (quindi ancora durante la stazione eretta) l'attività elettromiografica declina notevolmente. Allo stesso modo la forza prodotta sulla piattaforma aumenta con l'aumento dell'allungamento muscolare, e diminuisce all'inizio dell'accorciamento del muscolo tricipite della sura, fino a che il piede lascia il suolo (23);
- b) modificazioni nel sistema di controllo motorio tali che maggiore importanza è posta nella fase di contrazione eccentrica. Questo è più economico, perché l'efficienza dell'esercizio eccentrico può essere di molte volte più grande rispetto a quello dell'esercizio puro (3).

In conclusione, ci sono due meccanismi, elastico e neurale, che contribuiscono a potenziare la prestazione della fase concentrica di una contrazione muscolare (22). L'elasticità probabilmente gioca il ruolo più importante in questo processo di potenziamento.

*Indirizzo dell'Autore:
Dr. Nicola Maffulli
Dep. of Orthopaedic Surgery
University of Aberdeen Medical School
Polwarth Building
Foresterhill
Aberdeen AB9 2ZD, Scotland*

BIBLIOGRAFIA

- 1) ALEXANDER R.M., BENNET-CLARK, H.C. (1977) *Storage of elastic strain energy in muscle and other tissues*. Nature 265:114-117.
- 2) ALEXANDER R.M., (1984) *Stride length and speed for adults, children, and fossil hominids*. American Journal of Physical Anthropology 63:23-27.
- 3) ASMUSSEN E. (1952) *Positive and negative muscle work*. Acta Physiologica Scandinavica 28:364-382.
- 4) ASMUSSEN E., BONDE-PETERSEN F. (1974) *Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscle during exercise*. Acta Physiologica Scandinavica 92:537-545.
- 5) ASMUSSEN E., SORENSEN F. (1971) *The "wind up" movements in athletics*. Le Travail Humain 34:537-545.
- 6) ASTRAND P.O., RODAHL K. (1986) *Textbook of work physiology. The physiological bases of exercise*. Third Edition. McGraw Hill. New York.
- 7) BATES T., OSTERING L.R., MASON B.R. (1978) *Lower extremity function during the support phase of running*. Biomechanics VI-B:30-39. University Press, Baltimore, USA.
- 8) BIGLAND B., LIPPOLD O.C.J. (1954) *The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscles*. Journal of Applied Physiology 123:214-224.
- 9) BIGLAND-RITCHIE B., WOODS J.J. (1974) *Integrated EMG and oxygen intake during dynamic contraction of human muscles*. Journal of Applied Physiology 36:475-479.
- 10) BOSCO C., ITO A., KOMI P.V., LUHTANEN P., RAHAKILA P., RUSKO A., VIITASALO J.T. (1982) *Neuromuscular function and mechanical efficiency of human leg extensor muscles during jumping exercise*. Acta Physiologica Scandinavica 114:543-550.
- 11) BOSCO C., KOMI P.V. (1979) *Potential of the mechanical behavior of the human skeletal muscles pre-stretching*. Acta Physiologica Scandinavica 106:467-472.
- 12) BOSCO C., KOMI P.V., ITO A. (1979) *Pre-stretch potentiation of human skeletal muscles in ballistic movement*. Acta Physiologica Scandinavica 111:135-140.
- 13) BOSCO C., MONTANARI G., TARKKA I., LATTERI N., COZZI R., ACHELLI G., FAINA M., COLLI R., DAL MONTE A., LA ROSA M. (1987) *The effect of pre-stretch on mechanical efficiency of human skeletal muscle*. Acta Physiologica Scandinavica 131:323-329.
- 14) BOSCO C., TARKKA I., KOMI P.V. (1982) *Effects of elastic energy and myoelectrical potentiation on triceps surae during stretch shortening cycle exercises*. International Journal of Sports Medicine 3:137-140.
- 15) BOSCO C., TIHANYI KOMI P.V., FEKETE G., APOR G. (1982) *Store and recoil of elastic energy in slow and fast types of human skeletal muscles*. Acta Physiologica Scandinavica 116:343-349.
- 16) CAVAGNA G.A., CITTERIO G. (1974) *Effect of stretching on the elastic characteristic on the contractile component of frog striated muscles*. Journal of Physiology 239:1-14.
- 17) CAVAGNA G.A., DUSMAN B., MARGARIA R. (1968) *Positive work done by the previously stretched muscles*. Journal of Applied Physiology 24:21-32.
- 18) CAVAGNA G.A., SAIBENE F.P., MARGARIA R. (1963) *External work in walking*. Journal of Applied Physiology 18:1-9.
- 19) CAVAGNA G.A., SAIBENE F.P., MARGARIA R. (1964) *Mechanical work in running*. Journal of Applied Physiology 19:249-56.
- 20) CAVAGNA G.A., SAIBENE F.P., MARGARIA R. (1965) *Effect of negative work on the amount of positive work performed by an isolated muscle*. Journal of Applied Physiology 20:157-158.
- 21) CURTIN N.C., GILBERT K.M., KREZSCHMAR T., WILKIE D.R. (1974) *The effect of the performance of the work on the total energy output and metabolism during muscular contraction*. Journal of Physiology 238:455-472.
- 22) DELEZ J.P. (1961) *The mechanical properties of the semitendinosus at length greater than its length in the body*. Journal of Physiology 158:154-164.
- 23) DIETZ R. (1979) *Neural mechanism of human locomotion*. Journal of Neurophysiology 42:1212-1222.
- 24) EDMAN K.A., ELZINGA G., NOBLE M.I.M. (1978) *Enhancement of mechanical performance by stretching during tetanic contractions of vertebral skeletal muscles fibres*. Journal of Physiology 281:139-155.
- 25) FENN W.O. (1924) *The relationship between the work performed and the energy liberated in muscular contraction*. Journal of Physiology 58:373-395.
- 26) FLITNEY S.W., HIRST D.G. (1978) *Cross-bridge detachment and sarcomere give during stretch of active frog muscle*. Journal of Physiology 276:449-465.
- 27) HILL A.V. (1938) *Energy liberation and "viscosity" in muscle*. Journal of Physiology 93:4P-5P.
- 28) HUXLEY A.F., SIMMONS R.M. (1971) *Mechanical properties of the cross bridges of frog striated muscle*. Journal of Physiology 218:59-60P.
- 29) KANEKO M., FUCHIMOTO T., ITO A., TOIOOKA K.A.J. (1983) *Mechanical efficiency of sprinters and distance runners during constant speed running*. Biomechanics VIII-B 761-771 Human Publishers, Champaign, Illinois, USA.
- 30) KER R.F. (1981) *Dynamic tensile properties of the plantaris tendon of sheep*. Journal of Experimental Biology 93:283-302.
- 31) KER R.F., BENNET M.B., BIBBY S.R., KESTER R.C., ALEXANDER R.M., (1987) *The spring in the arch of the human foot*. Nature 325 (7000): 147-149.
- 32) LAWRENCE J.H., DE LUCA C.J. (1983) *Myoelectric signals versus force relationship in different human muscles*. Journal of Applied Physiology 54:1653-1659.
- 33) LEVIN A., WIMAN F. (1927) *The viscous elastic properties of the muscles*. Proceedings of the Royal Society (London) B101:218-243.
- 34) MARGARIA R., CAVAGNA G.A., SAIBENE F.P. (1963) *Possibilità di sfruttamento dell'elasticità del muscolo contratto durante l'esercizio muscolare*. Bollettino della Società Italiana di Biologia Sperimentale 34:1815-1816.
- 35) PUGH G.C.E. (1971) *The influence of the wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of working against horizontal or vertical forces*. Journal of Physiology 213:255-276.
- 36) THYS H., CAVAGNA G.A., MARGARIA R. (1975) *The role played by elasticity in an exercise involving movements of small amplitude*. Pflugers Archives European Journal of Physiology 254:281-286.
- 37) THYS H., FARRAGIANA T., MARGARIA R. (1972) *Utilization of muscle elasticity in exercise*. Journal of Applied Physiology 32:491-494.