

ANATOMIA E FISILOGIA DELL'APPARATO MUSCOLARE

Enrico ARCELLI

Una componente fondamentale di ogni sport è il movimento. Anzi si può dire che l'essenza stessa della maggior parte delle discipline sportive è il movimento:

- movimento dell'intero corpo rispetto all'ambiente esterno (come nella corsa nel nuoto, nella marcia, ecc.);
- oppure movimento di segmenti del corpo;
- oppure movimento di oggetti o attrezzi (pallone, disco, giavellotto, ecc.) che sono stati mossi dagli arti.

In tutti gli sport, tranne alcuni (come quelli motoristici, la vela, il volo a vela, e pochi altri) il movimento nasce dal fatto che i muscoli consentono lo spostamento di segmenti corporei rispetto al resto del corpo e rispetto all'ambiente esterno.

E' quindi molto importante capire quale è l'ultimo meccanismo che consente al muscolo di muovere le varie leve corporee, cioè gli consente di contrarsi e decontrarsi, gli permette insomma di aumentare e accorciare la propria lunghezza. La spiegazione di ciò inizia dalle caratteristiche morfologiche del tessuto muscolare.

Innanzitutto quando si parla di muscoli bisogna precisare che nei mammiferi ci sono tre tipi di muscoli:

- i muscoli lisci, involontari
- il muscolo cardiaco, striato involontario,
- i muscoli scheletrici, striati volontari.

E' appunto di questi ultimi che intendiamo qui occuparci. Sono infatti i muscoli scheletrici che permettono lo spostamento dei segmenti corporei gli uni rispetto agli altri e che quindi creano il movimento del corpo o degli attrezzi che vengono mossi dagli arti.

Il costituente più importante del muscolo, quello che ha la proprietà di contrarsi, è la fibra muscolare. La fibra muscolare è una cellula di forma cilindrica molto allungata. Per avere una idea delle dimensioni di questa cellula si pensi che ha uno spessore che va da 10 a 100 millesimi di millimetro e una lunghezza

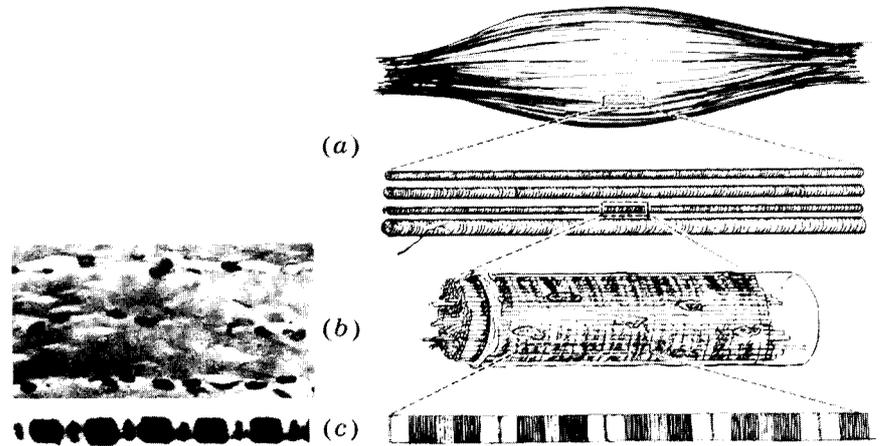


Fig. 1 - Illustrazione schematica di un muscolo striato: a) muscolo striato, b) fibre muscolari, c) miofibrille.

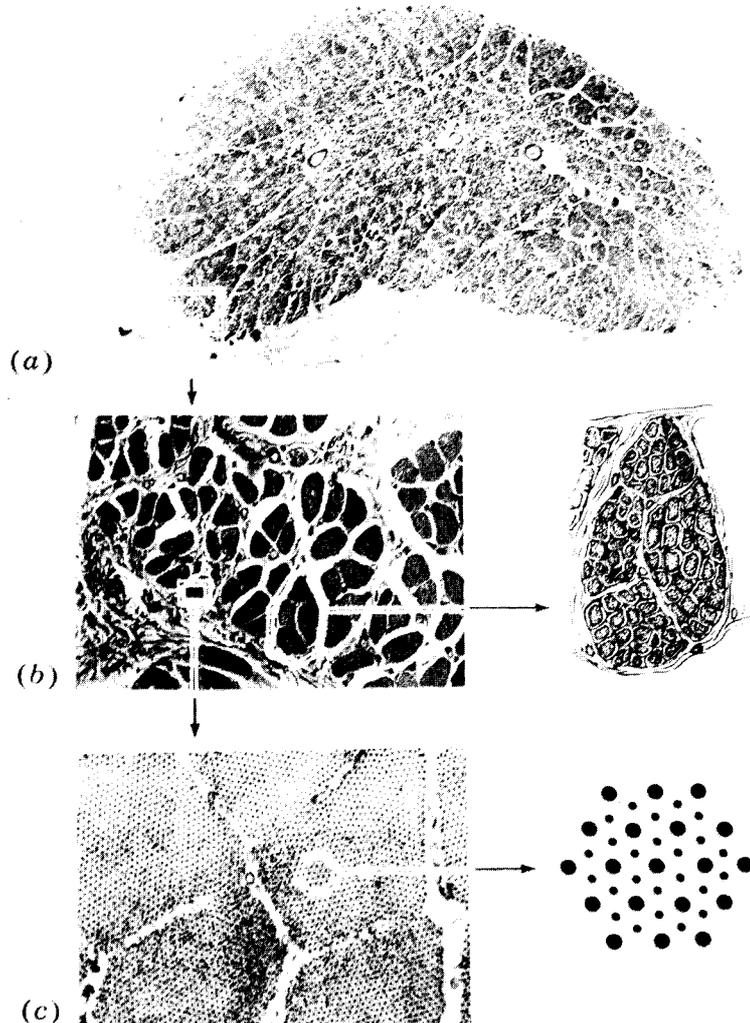


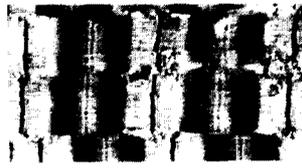
Fig. 2 - Sezione di un muscolo striato a), un maggiore ingrandimento mostra le fibre b) e le miofibrille c), disposte secondo uno schema regolare di filamenti spessi e sottili.

che è in genere di alcuni millimetri ma che può arrivare a trenta centimetri.

Rispetto alle altre cellule la fibra muscolare ha quindi dimensioni nettamente maggiori.

La fibra dei muscoli scheletrici è detta striata perché presenta una netta striatura, determinata dall'alternarsi di strie più chiare e di strie più scure.

E' importante vedere come è costituita la fibra muscolare, perché, come si è detto, è proprio conoscendone bene la costituzione che è più facile comprenderne il funzionamento.



(d)

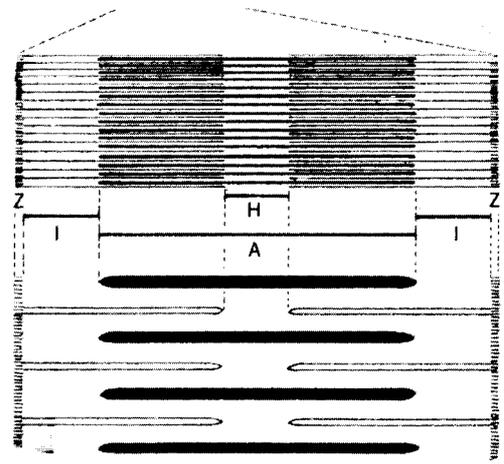
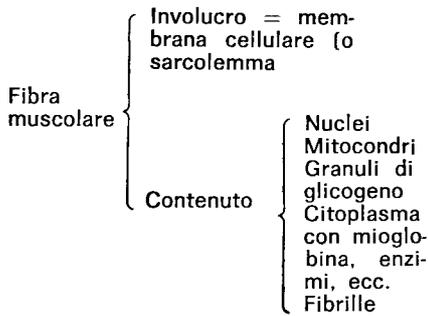


Fig. 3 - Il sarcomero.



che è chiamata banda H. Anche la banda chiara (o banda I) non ha un aspetto uniforme, essendo interrotta a metà da una riga scura, la linea Z.

Quando si osservano le cose ad un ingrandimento maggiore si può constatare come questi cambiamenti di colore delle fibrille sono dovuti ad un arrangiamento ordinato di due tipi di filamenti (filamenti sottili e filamenti spessi) che sono in parte sovrapposti gli uni agli altri.

Nella singola fibrilla c'è una una struttura che è appunto indicata schematicamente in questa figura.

ghezza di riposo, è di circa $2,5\mu$.

Partendo appunto dalla linea Z, si vede come i filamenti sottili sono ad essa collegati, ma non raggiungono il centro del sarcomero.

I filamenti spessi, invece, sono nella parte mediana del sarcomero e non toccano la linea Z.

Proprio a questa disposizione dei filamenti è dovuto l'alternarsi di bande A e bande I.

Alle bande A corrispondono quelle parti del sarcomero in cui ci sono i filamenti spessi. Alle bande I corrispondono le zone in cui ci sono solo i filamenti sottili. Nella maggior parte della banda A, comunque, ci sono sia i filamenti spessi che quelli

Si può dire che in ciascuna fibra muscolare si riconosce:

- un involucro, la membrana cellulare o sarcolemma
- un contenuto; nel caso della cellula muscolare ci sono:

- nuclei piatti, anche oltre cento in una sola cellula, tutti disposti alla periferia, come schiacciati contro la parete interna della membrana;
- mitocondri;
- granuli di glicogeno;
- citoplasma: con mioglobina ed enzimi citoplasmatici;

ma soprattutto ci sono:

- le miofibrille, che costituiscono la maggior parte del contenuto cellulare (\varnothing da 1 a 3μ).

Sono proprio le miofibrille che danno alla fibra la sua caratteristica striatura.

Come si è detto, lungo il diametro maggiore di ciascuna fibrilla si alternano bande scure e bande chiare. La banda scura è detta banda A (o Anisotropica); la banda chiara è detta banda I (o Isotropica).

Se si osservano meglio tali bande si può notare come nella parte di mezzo della banda scura (o banda A), c'è una zona meno scura



(c)

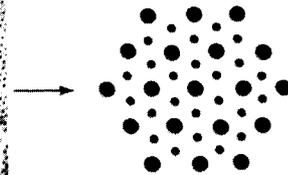


Fig. 4 - c) Le miofibrille, disposte secondo uno schema regolare di filamenti spessi e sottili.

Ci sono filamenti sottili (quelli più chiari) e filamenti spessi (quelli più scuri).

Sono tutti paralleli fra loro e paralleli all'asse maggiore delle fibrille.

Essi però non si sovrappongono del tutto gli uni agli altri.

Il tratto compreso da una linea Z all'altra è detto sarcomero; la lunghezza di un sarcomero (cioè la distanza da una linea Z a una linea Z) quando il muscolo è alla lun-

sottile. Nella parte mediana della banda A, però, ci sono solo i filamenti spessi: è questa la zona meno scura che prende il nome di banda H.

L'accorciamento del muscolo (cioè la contrazione) è dovuta alla somma di notevoli accorciamenti di sarcomeri.

L'accorciamento del sarcomero si verifica per un avvicinamento di una linea Z all'altra, senza che i singoli filamenti (per lo meno inizial-

mente) si accorcino o si ispessiscano.

Nella presente figura si vedono tre diverse situazioni del sarcomero.

— Nella figura di mezzo il muscolo è nella posizione di riposo e la

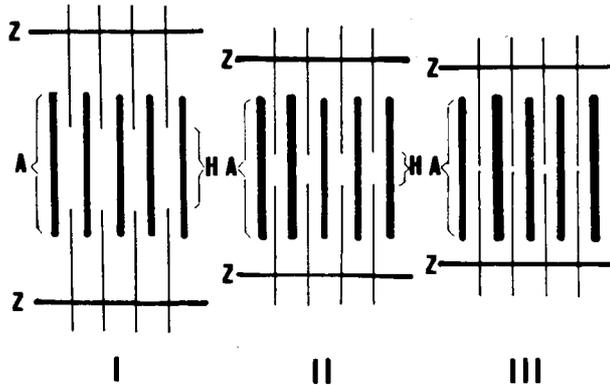


Fig. 5

distanza fra Z - Z è di $2,5\mu$.

— Nella figura di sinistra il muscolo è stato stirato e la distanza Z - Z è più di 3μ .

— Nella figura di destra il muscolo è contratto e la distanza Z-Z è di circa 2μ .

Se questo è l'aspetto schematico dell'accorciamento del sarcomero, per avere un'idea più precisa di quello che avviene, dobbiamo conoscere più da vicino le caratteristiche dei filamenti e dei rapporti fra loro.

I filamenti spessi sono costituiti da molte molecole di miosina legate fra di loro.

La singola molecola di miosina ha all'incirca la forma di un fiammifero o di una mazza da golf. Cioè è costituita da una parte molto allungata (la cosiddetta coda) e da una estremità piuttosto ingrossata (la testa).

La testa della miosina è particolarmente importante, sia perché è quella che garantisce il collegamento fra i filamenti spessi e quelli sottili, sia perché ha proprietà enzimatiche, cioè è una ATPasi, è in grado insomma di scindere l'ATP e di rendere utilizzabile l'energia. Si noti ancora che la testa (o estremità bulbare) è snodata rispetto alle code.

E' proprio per questo (cioè il fatto dell'angolo tra l'asse della coda e l'asse della testa può cambiare) che fa sì che, come si dirà più avanti, il sarcomero possa accorciarsi e, in definitiva, il muscolo possa contrarsi.

Le varie molecole di miosina sono legate fra loro per formare il filamento spesso della fibrilla. In realtà a legarsi fra di loro sono le code che così, nel loro insieme, vengono a sostituire il filamento spesso vero e proprio; le teste, che

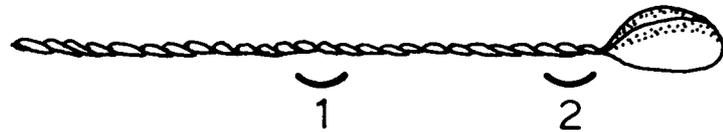
noti che nel filamento spesso le molecole di miosina sono orientate in un senso e metà nell'altro, nel senso che nella metà di destra del filamento tutte le teste sono rivolte verso l'estremità di destra, mentre nella metà di sinistra le teste sono rivolte verso l'estremità di sinistra. Succede così che la parte di mezzo del filamento spesso è costituita da sole code; in tale parte cioè non ci sono teste.

Quando il muscolo è a riposo, questa parte senza teste è quella che non è sovrapposta ai filamenti leggeri.

Le teste, come si è detto, costituiscono la zona nella quale la miosina si collega con l'actina (i filamenti spessi con quelli leggeri).

Parliamo ora del filamento leggero. Schematicamente si può dire che esso è costituito a sua volta soprattutto da due filamenti un po' attorcigliati fra di loro. Qualcuno invece paragona il filamento leg-

in questo modello sono disposte a zig-zag, invece, costituiscono delle specie di protuberanze laterali. Si



1 = zona tripsino-sensibile

2 = zona papaino-sensibile

Fig. 6 - Molecola di miosina.

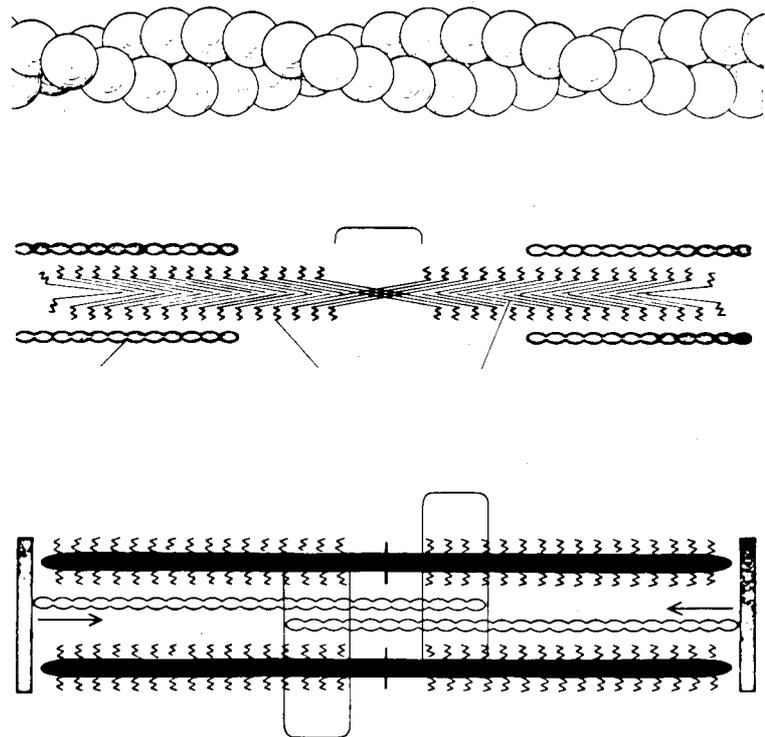


Fig. 7 - Filamenti di actina e di miosina e ponti acto-miosinici.

gero a due collane di perle intrecciate fra di loro. Il paragone è molto suggestivo. Ogni perla di queste due collane è costituita da una molecola di actina. In realtà il filamento leggero è un pò più complesso, dal momento che oltre alle molecole di actina ci sono altre molecole: ogni tratto di 7-8 perle, per esempio c'è costantemente una molecola di un altro tipo, la troponina. Una parte della troponina (la sotto unità che viene indicata con la lettera C, o anche come troponina-C) ha una funzione importante nella contrazione muscolare.

La troponina-C infatti impedisce che possa avvenire il legame fra la testa della miosina e l'actina; ha cioè un'azione inibitoria. Tale azione inibitoria viene rimossa dagli ioni di calcio.

cessare l'impedimento sterico che non permetteva il collegamento fra la testa della miosina e l'actina.

Resta ora da spiegare come si verifichi lo scivolamento dei filamenti sottili rispetto a quelli spessi, come si verifichi cioè un accorciamento del sarcomero, cioè un'avvicinamento di una linea Z all'altra Z.

La premessa, come si è detto, è il legame fra le teste della miosina (che in questa figura sono rappresentate da protuberanze del filamento spesso) e il filamento sottile.

Una teoria molto accreditata è che a spostare il filamento sottile rispetto al filamento spesso sia il cambiamento dell'angolo formato fra la testa e la coda della miosina, al livello di quel punto di snodo del quale si è detto in precedenza.

Poiché il punto di legame fra la

si ripete con un nuovo legame fra la testa della miosina e un'altra molecola di actina, questa volta più vicina alla linea Z.

In seguito a tanti piccoli spostamenti successivi nel singolo sarcomero e alla somma di tutti gli spostamenti dei vari sarcomeri si verifica l'accorciamento del muscolo.

Tappe della contrazione muscolare:

- Impulso nervoso
- Liberazione di Ca^{2+}
- Rimozione della inibizione
- Legame miosina-actina
- Rotazione testa miosina
- Scivolamento filamento sottile
- Rottura legame miosina-actina
- Ripetizione del ciclo

In definitiva si può dire che al livello del sarcomero le successive tappe della contrazione muscolare possono essere schematizzate in questa maniera:

- arriva l'impulso nervoso;
- insorge un'onda di depolarizzazione trasmessa dal sarcolemma;
- al livello delle cisterne del reticolo endoplasmatico c'è la liberazione di ioni calcio;
- gli ioni calcio si legano alla troponina-C;
- ciò provoca un cambiamento della conformazione della troponina-C e provoca una rimozione dell'inibizione;
- si forma un legame fra la testa della miosina e l'actina;
- la testa dell'actina ruota a pendolo (oppure come i remi di una barca);
- il filamento sottile si sposta rispetto al filamento spesso;
- si rompe il legame e la testa della miosina torna alla posizione iniziale;
- si ripete il ciclo.

Il movimento dei filamenti sottili rispetto a quelli spessi in pratica, non è uniforme ma avviene a piccoli tratti per volta.

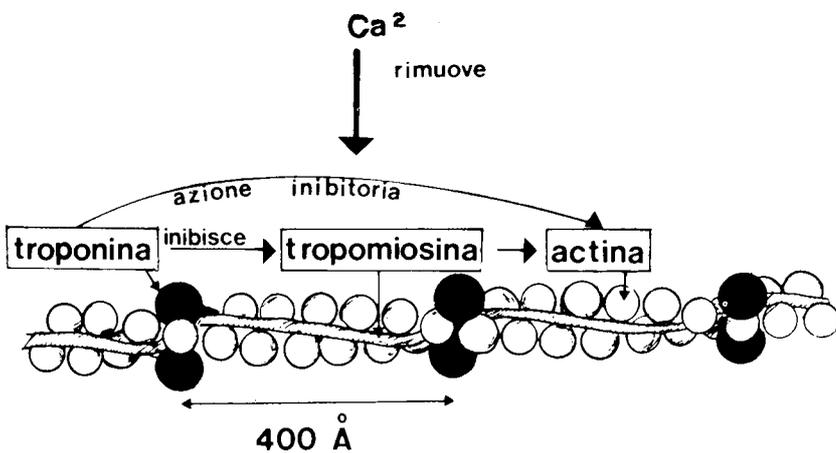


Fig. 8

In questa figura si vede quale è il meccanismo attraverso il quale si verifica l'azione inibitoria della troponina-C. Tale sotto unità - qui indicata con la lettera C - è disposta fra la molecola della miosina e quella dell'actina ed impedisce che si verifichi il legame fra le due molecole. Questa è la situazione che si ha nel muscolo a riposo.

Quando però si ha lo stimolo per la contrazione muscolare, dalle cisterne del reticolo endoplasmatico vi è rilascio di ioni calcio. Questi ioni di calcio, vengono captati dalla troponina-C e come effetto di ciò si ha una variazione conformazionale della sotto unità il che provoca uno spostamento di molecole come si può vedere nella successiva figura.

In questa figura si vede come la troponina C la troponina T la troponina E e la tropomiosina si spostano verso il solco compreso fra le due molecole di actina. Con ciò viene a

testa della miosina e dell'actina è fisso, la variazione di questo angolo provoca uno scivolamento del filamento sottile.

La testa della miosina (o meglio le teste di molte molecole di miosina simultaneamente) si muovono a pendolo e trascinano il filamento sottile.

Avvenuto questo slittamento il legame fra actina e miosina si rompe e la testa della miosina torna nella posizione non ruotata. Il ciclo

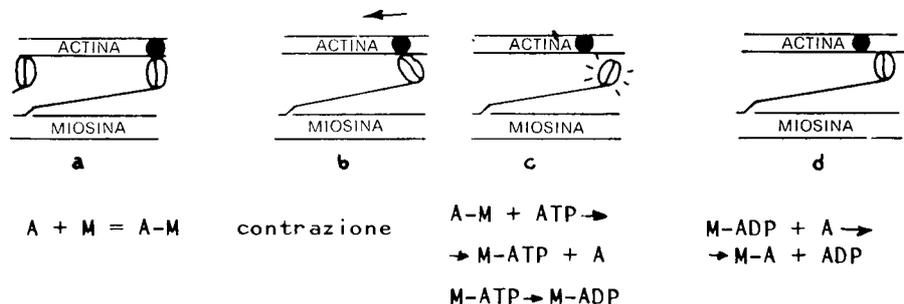


Fig. 9