

Accorciamento muscolare: modello fisico-matematico e alterazioni della statica e della dinamica

Dott. Mauro Lastrico – dott.ssa Laura Manni

Meccanica Muscolare

1 L'osservazione clinica dell'accorciamento muscolare

Nella pratica clinica si riscontra un fenomeno particolare: i muscoli, in assenza di patologie specifiche congenite o acquisite, neurologiche o di altra natura, possono tendere progressivamente a diminuire la propria lunghezza.

Tale accorciamento si manifesta con la riduzione della lunghezza di base del muscolo che, pur mantenendo integra la sua capacità contrattile, determina l'alterazione della geometria articolare.

Ciò comporta una limitazione dell'escursione articolare e, conseguentemente, una modifica della fisiologica sequenza del movimento.

Per comprendere i meccanismi sottesi a questo fenomeno, è possibile analizzare il comportamento delle componenti elastiche del muscolo, secondo i principi della fisica dei materiali.

2 Le leggi fisiche della deformazione elastica

La fisica insegna che qualunque materiale sottoposto a forze deformanti subisce modificazioni in base al proprio coefficiente di elasticità.

Questo principio universale si applica anche ai tessuti biologici e fornisce la chiave interpretativa per comprendere il fenomeno dell'accorciamento muscolare.

Il coefficiente di elasticità ideale è uguale a 1 e rappresenta un materiale perfettamente elastico che restituisce interamente l'energia accumulata, ritornando esattamente allo stato iniziale.

Come è noto dalla fisica, tali materiali in natura non esistono ed il valore uguale ad 1 costituisce un riferimento teorico ideale.

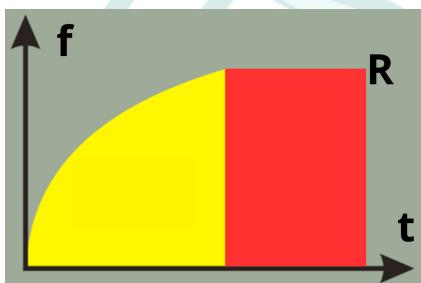


Fig. 1 - Nella figura è rappresentata la curva di deformazione dei materiali elasticci ideali con coefficiente $E = 1$. L'area in giallo rappresenta la completa restituzione dell'energia accumulata. Le variabili sono forza f e tempo t .

I materiali reali presentano coefficienti di elasticità inferiori a 1.

Di conseguenza, quando vengono sottoposti a forze deformanti, mantengono deformazioni residue che risultano proporzionali sia all'intensità della forza applicata che al tempo di applicazione.

Ciò significa che maggiore è il prodotto forza-tempo, maggiore sarà la deformazione permanente del materiale.



3 L'applicazione delle leggi fisiche al tessuto muscolare

Nel muscolo sono presenti due materiali elasticci differenti: la parte contrattile dell'actina e miosina e la parte connettivale delle membrane e dei tendini.

Per quanto concerne la parte contrattile del muscolo, questa potrà solo contrarsi e rilasciarsi. Il suo coefficiente di elasticità è molto alto e, più che in modificazioni strutturali permanenti, è interessata ed implicata negli innalzamenti del tono muscolare.

Le componenti connettivali, invece, avendo un coefficiente di elasticità minore, potranno rimanere accorciate o allungate in maniera proporzionale alla forza, alla durata e alla frequenza dello stimolo loro applicato.

Ciò determina che, sottoposti a forze complessive prolungate nel tempo, questi tessuti mantengano deformazioni residue.

Tale differenza di comportamento elastico trova riscontro nella pratica clinica: mentre le tecniche di rilassamento muscolare risultano efficaci nell'agire sul tono basale, cioè sulla componente contrattile, il loro effetto risulta limitato sugli accorciamenti consolidati a carico del tessuto connettivale.

4 Classificazione meccanica degli elementi elasticci

Schematicamente gli elementi elasticci connettivali del muscolo vengono divisi in due categorie in base al loro comportamento meccanico.

Gli elementi elastici in serie sono costituiti dai tendini e dai loro prolungamenti all'interno del ventre muscolare.

La loro azione è quella di "ammortizzare" le sollecitazioni prodotte durante la contrazione muscolare, sia quando il muscolo si accorta, sia quando si stira.

Inoltre, la presenza di strutture protettive come gli organi tendinei del Golgi, impedisce la lesione di questi elementi inducendo rilasciamento muscolare quando la tensione diventa eccessiva.

Un ulteriore vantaggio offerto da queste strutture è quello di restituire l'energia accumulata, come una molla, in base alla loro elasticità.

Gli elementi elastici in parallelo sono costituiti dal sarcolemma, dalle altre membrane connettivali e dal tessuto connettivale interposto.

La loro azione è quella di "smorzare" le sollecitazioni prodotte dagli stiramenti riducendo le resistenze.

Durante la contrazione muscolare, questi elementi subiscono una compressione diretta e, in funzione del prodotto forza-tempo applicato, possono mantenere deformazioni residue.

È a questo livello che si determina l'accorciamento permanente del muscolo.

5 Il modello fisico-matematico della fibra muscolare

Utilizzando una semplificazione del comportamento della fibra muscolare su modello matematico si avrà:

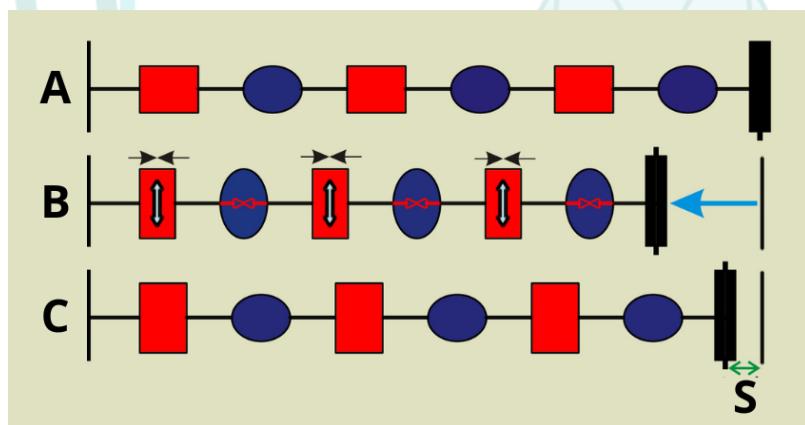


fig. 3

- A: fibra muscolare a riposo
- B: contrazione
- C: rilasciamento
- S: sommatoria accorciamento muscolare residuo
- rosso: porzioni connettivali disposte in parallelo
- blu: porzioni contrattili dell'actina e miosina
- linee nere verticali: inserzioni del muscolo

Durante la fase di contrazione con avvicinamento delle inserzioni (B), le componenti contrattili dell'actina e miosina si deformano attivamente in compressione e trazionando le componenti connettivali disposte in parallelo, ne determinano la loro ulteriore compressione.

Non sono state rappresentate le componenti connettivali disposte in serie in quanto queste non subiscono modificazioni durante la fase attiva.

In funzione della forza/tempo di contrazione, al momento del rilasciamento la parte contrattile, avendo un coefficiente di elasticità molto alto, può tornare alle condizioni di partenza o residuare una deformazione compressiva che si manifesta con l'aumento del tono basale.

La componente connettivale in parallelo, avendo un coefficiente di elasticità inferiore, avrà subito delle modifichepressive residue.

A fine contrazione, quindi, tutte le componenti connettivali avranno subito una modificazione di tipo compressivo e la loro sommatoria determina l'accorciamento residuo del muscolo (S).

6 Il muscolo come forza compressiva

Il muscolo agisce come una forza compressiva e non è in grado, autonomamente, di allontanare le proprie inserzioni.

Questo principio della meccanica muscolare ha conseguenze dirette sulla comprensione delle alterazioni scheletriche: dal momento che lo scheletro è privo di capacità di movimento autonomo, la modifica della fisiologica sequenza articolare, in assenza di specifiche patologie, è conseguenza delle forze muscolari in accorciamento.

7 Le conseguenze scheletriche dell'accorciamento muscolare

Le contrazioni muscolari con avvicinamento delle inserzioni e le isometriche non in massimo allungamento fisiologico o relativo, in funzione della forza/tempo di contrazione, produrranno una perdita della lunghezza del muscolo a carico della componente connettivale ed un aumento del tono basale a carico della porzione contrattile.

A livello scheletrico, la conseguenza sarà che le ossa su cui i muscoli si inseriscono subiranno progressivamente delle forze vettoriali di trazione, tali da modificarne la fisiologica sequenzialità.

A livello muscolare, il progressivo accorciamento della componente connettivale e l'aumento del tono basale della parte contrattile, determinano l'aumento della forza resistente del muscolo e, al contempo, ne diminuiscono la capacità di Lavoro (forza per spostamento) e di Potenza (il Lavoro prodotto nell'unità di tempo).

Questo meccanismo, sempre in assenza di patologie specifiche, spiega le alterazioni della fisiologica sequenza articolare osservabili clinicamente.

Lo scheletro si adatta passivamente alle forze muscolari secondo leggi meccaniche.

In questo senso, l'artrosi è vista come effetto non causa.

La trazione muscolare, agendo sui capi ossei in accorciamento, altera la fisiologica distribuzione delle forze.

Questo porta all'addensamento delle linee di forza in zone ristrette delle superfici articolari.

Tale squilibrio vettoriale genera una sovracompressione endo-articolare anomala e cronica che, in funzione della forza e del tempo applicati, induce il danno tissutale e cartilagineo tipico del fenomeno artrosico.

Carico meccanico interno e carico esterno

Nel linguaggio clinico il termine carico viene spesso implicitamente associato alla forza peso o all'applicazione di resistenze esterne.

Dal punto di vista biomeccanico, tuttavia, questa equivalenza non è corretta.

Il sistema muscolo-scheletrico può essere soggetto a carichi meccanici elevati anche in assenza di forze esterne rilevanti, quando le forze interne generate dai muscoli in accorciamento producono compressioni articolari persistenti.

In questi casi il carico non deriva da ciò che grava sul corpo, ma da come le forze si distribuiscono al suo interno.

Questa distinzione è essenziale per comprendere perché disassimenti, conflitti articolari e processi degenerativi possano svilupparsi anche in condizioni di apparente "scarico funzionale" o di attività minima.

8 La relazione tra forza resistente, Lavoro e Potenza

Il progressivo accorciamento della componente connettivale e l'aumento del tono basale della parte contrattile determinano l'aumento della forza resistente del muscolo.

Per forza resistente si intende la resistenza che il muscolo oppone alla trazione, cioè all'allungamento.

Tale aumento comporta, nello stesso tempo, la diminuzione della capacità di Lavoro del muscolo, lavoro inteso come forza per spostamento, e della Potenza, cioè il Lavoro prodotto nell'unità di tempo.

Ciò significa che un muscolo con componenti connettivali accorciate, pur mantenendo intatta la capacità contrattile, deve impiegare parte della propria energia per vincere le resistenze interne prima di produrre movimento utile.

Il principio è analogo a quello di un sistema meccanico in cui sia presente un attrito interno: il motore (componente contrattile) funziona perfettamente ma parte dell'energia viene dissipata per vincere la resistenza (componente connettivale accorciata) prima di produrre movimento efficace.

La conseguenza è che il muscolo, pur non essendo realmente debole, risulta inefficiente dal punto di vista meccanico.

Questo principio trova riscontro clinico in tutte quelle situazioni di immobilizzazione prolungata.

Ad esempio, dopo la rimozione di un gesso per frattura dell'omero, il gomito si presenta frequentemente in flessione.

Tale atteggiamento è determinato dall'accorciamento delle componenti connettivali dei muscoli flessori che, avendo subito una compressione mantenuta per il tempo dell'immobilizzazione, hanno sviluppato un'aumentata forza resistente.

In questa condizione, i flessori del gomito oppongono resistenza all'estensione, sia quando questa viene indotta passivamente attraverso manovre di allungamento eseguite dall'operatore, sia quando viene tentata attivamente attraverso la contrazione del tricipite.

Paradossalmente però, se si valuta la capacità dinamica degli stessi flessori, questa risulta diminuita proprio perché l'energia contrattile disponibile viene in parte dissipata per vincere le resistenze interne del tessuto connettivale accorciato.

La differenziazione tra forza resistente, Lavoro e Potenza è il concetto chiave per comprendere come l'accorciamento muscolare influenzi non solo la statica ma anche la dinamica del movimento.

9 Implicazioni sistemiche dell'accorciamento muscolare

L'accorciamento progressivo delle componenti connettivali non rimane un fenomeno isolato ma determina conseguenze che si ripercuotono sull'intero sistema muscolo-scheletrico.

A livello statico, la modificaione della lunghezza muscolare costringe le articolazioni ad adattarsi secondo nuovi assi.

Ciò comporta che i carichi anziché distribuirsi uniformemente sulle superfici articolari, si concentrino in aree ristrette, determinando sollecitazioni asimmetriche.

Tale alterazione della distribuzione delle forze può, nel tempo, favorire l'insorgenza di processi degenerativi endo-articolari.

A livello dinamico, l'accorciamento muscolare determina una limitazione meccanica dell'escursione articolare.

Il movimento, per essere eseguito, richiede un maggior dispendio energetico in quanto parte dell'energia contrattile viene dissipata per vincere le resistenze interne.

Come conseguenza il sistema è costretto ad adottare pattern di movimento alternativi che, pur permettendo la funzione, si discostano dal modello fisiologico.

Questi adattamenti innescano un meccanismo di perpetuazione del fenomeno.

I pattern alterati di movimento, infatti, determinano ulteriori accorciamenti compensatori in altri distretti muscolari e, il sistema nervoso, attraverso la plasticità dello schema corporeo, tende a normalizzare le alterazioni interpretandole come nuova condizione di base.

Si instaura così un circuito di autoalimentazione in cui l'accorciamento muscolare genera alterazioni degli assi scheletrici che, a loro volta, determinano ulteriori accorciamenti, amplificando progressivamente il fenomeno iniziale.

10 Reversibilità dell'accerchiamento muscolare

Le stesse leggi fisiche che spiegano il meccanismo dell'accerchiamento forniscono anche i principi per la sua reversibilità.

Il tessuto connettivale, dotato di un coefficiente di elasticità inferiore a 1, mantiene la capacità di essere deformato sia in accerchiamento che in allungamento, in funzione delle forze applicate e del tempo di applicazione.

La reversibilità del fenomeno richiede l'applicazione di tecniche terapeutiche specifiche per tempi compatibili con le proprietà del materiale biologico trattato.

11 La veridicità operativa dell'ipotesi

L'accerchiamento muscolare inteso come fenomeno di riduzione della lunghezza muscolare disponibile è un dato clinico empirico rilevabile quotidianamente nella pratica clinica attraverso l'osservazione e l'analisi dei test di escursione articolare.

L'ipotesi esposta in questo capitolo – cioè che tale accerchiamento sia primariamente dovuto alla deformazione viscoelastica delle componenti connettivali causata da forze complessive in funzione della loro forza/tempo di applicazione - rappresenta un modello interpretativo logico, dedotto dall'applicazione dei principi della fisica dei materiali.

La verifica sperimentale diretta di questa dinamica a livello istologico non è attualmente realizzabile, poiché dovrebbe essere effettuata sezionando il tessuto nel soggetto vivente.

Le prove meccaniche focalizzate sulla trazione muscolare, poi, non replicherebbero le condizioni di lavoro in compressione cronica che si verificano *in vivo*.

Pertanto, la veridicità di questa ipotesi si fonda sul piano operativo e clinico:

1. offre una spiegazione coerente per l'alterazione della sequenza articolare, prevedendo le dominanze vettoriali e i compensi a cascata.
2. è confermata indirettamente dal successo degli interventi terapeutici che mirano nello specifico al recupero di lunghezza della componente connettivale del muscolo accerchiato e al ripristino dell'equilibrio vettoriale (Forza Resistente / Forza Lavoro), portando alla risoluzione del sintomo.

In questo senso, il modello è un'ipotesi causale esposta alla verifica clinica: finché l'osservazione mostrerà che l'accerchiamento muscolare altera gli assi articolari e che recuperare lunghezza risolve sintomi e disassamenti, il modello resta valido.

Coerentemente con il pensiero di K. Popper, cioè, il modello è valido finché resiste alla verifica clinica, pur rimanendo aperto alla possibilità di essere confutato da nuovi dati.

12 Concetti chiave

In questo capitolo sono stati esposti i principi fisici che spiegano il fenomeno dell'accerchiamento muscolare osservabile clinicamente.

I concetti fondamentali trattati sono:

- Il comportamento elastico differenziato delle componenti muscolari: la porzione contrattile (actina e miosina) con coefficiente di elasticità elevato che determina variazioni del tono basale e la porzione connettivale con coefficiente inferiore che mantiene deformazioni residue
- Il modello fisico-matematico della contrazione che dimostra come le forze complessive applicate per tempo sufficiente determinino l'accorciamento permanente delle componenti connettivali
- La relazione inversamente proporzionale tra forza resistente e capacità di Lavoro: l'accorciamento connettivale aumenta le resistenze interne che il muscolo deve vincere, diminuendone l'efficienza meccanica
- Le conseguenze sistemiche dell'accorciamento: alterazioni degli assi articolari, distribuzione asimmetrica dei carichi, pattern di movimento compensatori e instaurazione di un circuito di autoalimentazione
- La reversibilità del fenomeno secondo gli stessi principi fisici che ne determinano l'insorgenza

