

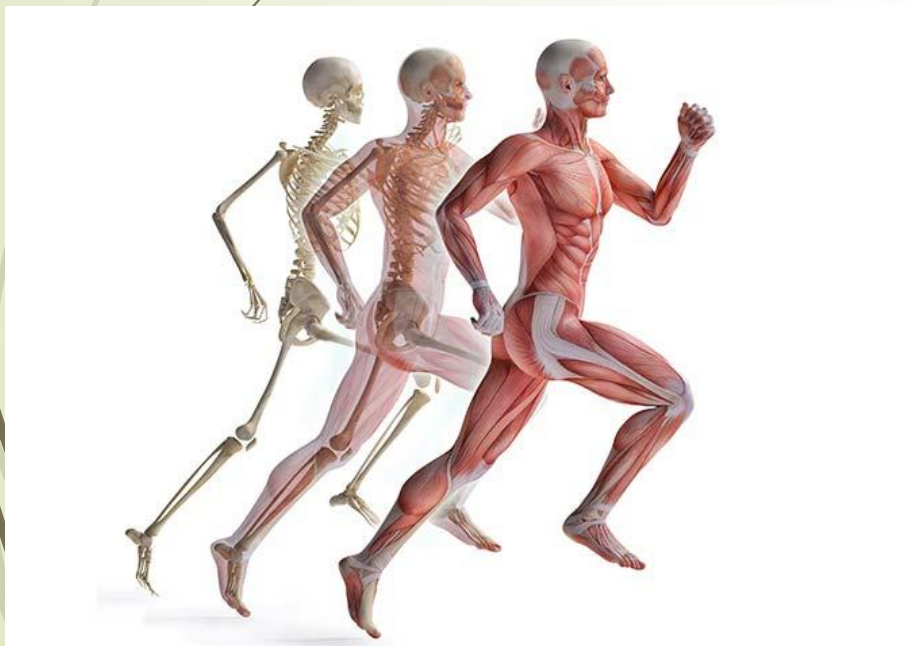


Anatomia e fisiologia del sistema muscolare

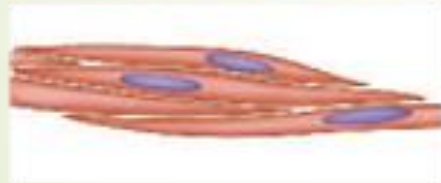
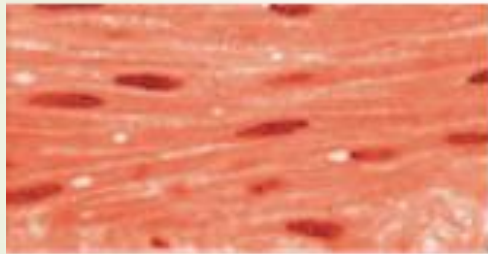
a cura di Antonio Incandela

Il tessuto muscolare e le sue funzioni

Il tessuto muscolare è uno dei 4 tipi principali di tessuti presenti nell'organismo umano nel quale svolge svariate funzioni, quali il **produrre movimenti del corpo, mantenere la postura, produrre calore, movimentare liquidi e sostanze all'interno del corpo, regolare il volume degli organi.**



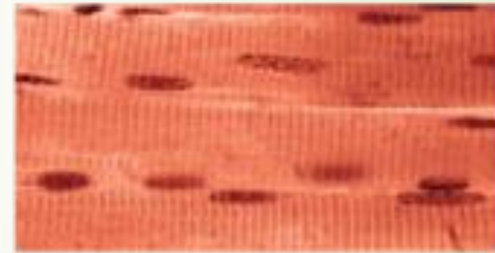
I tre tipi di tessuto muscolare



Tessuto muscolare
liscio



Tessuto muscolare
cardiaco

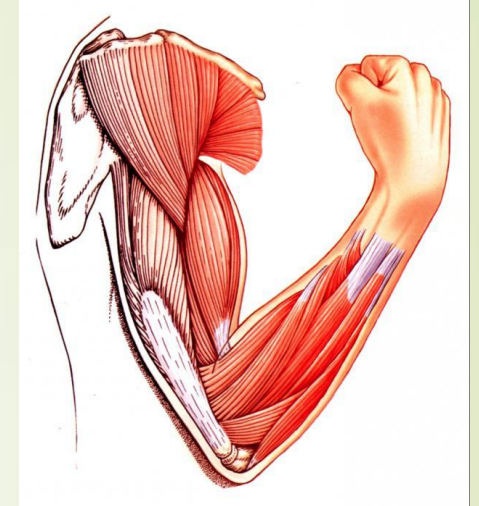
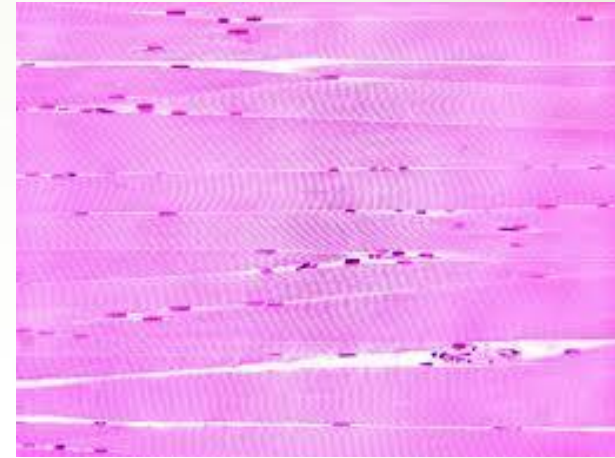


Tessuto muscolare
scheletrico

Tessuto muscolare scheletrico

Le principali caratteristiche

- Al microscopio, i suoi elementi presentano una tipica striatura trasversale e longitudinale
 - È responsabile dei movimenti volontari
 - Nei **muscoli scheletrici** si collega alle ossa tramite i tendini



- Nei **muscoli pellicciai** è connesso con la cute, formando sottili lamine situate nello spessore del tessuto sottocutaneo

I muscoli pellicciai del capo sono detti **muscoli mimici** in quanto responsabili dell'espressione del viso



Il tessuto muscolare striato scheletrico deriva dal mesenchima, le cui cellule, differenziandosi, originano i **mioblasti** mononucleati.

Dalla fusione di più mioblasti, si formano dei sincizi detti **miotubi**, i quali, a loro volta, in gruppi, diventeranno delle **fibre muscolari**, i componenti di ogni muscolo scheletrico.

Alcuni mioblasti permangono nell'adulto come cellule staminali unipotenti dette **cellule satelliti** che, in seguito a traumi, si attivano e proliferano per la riparazione di eventuali danni.

Origine del tessuto muscolare striato



Struttura del muscolo scheletrico

Ogni muscolo scheletrico è un vero e proprio organo composto da migliaia di fibre muscolari

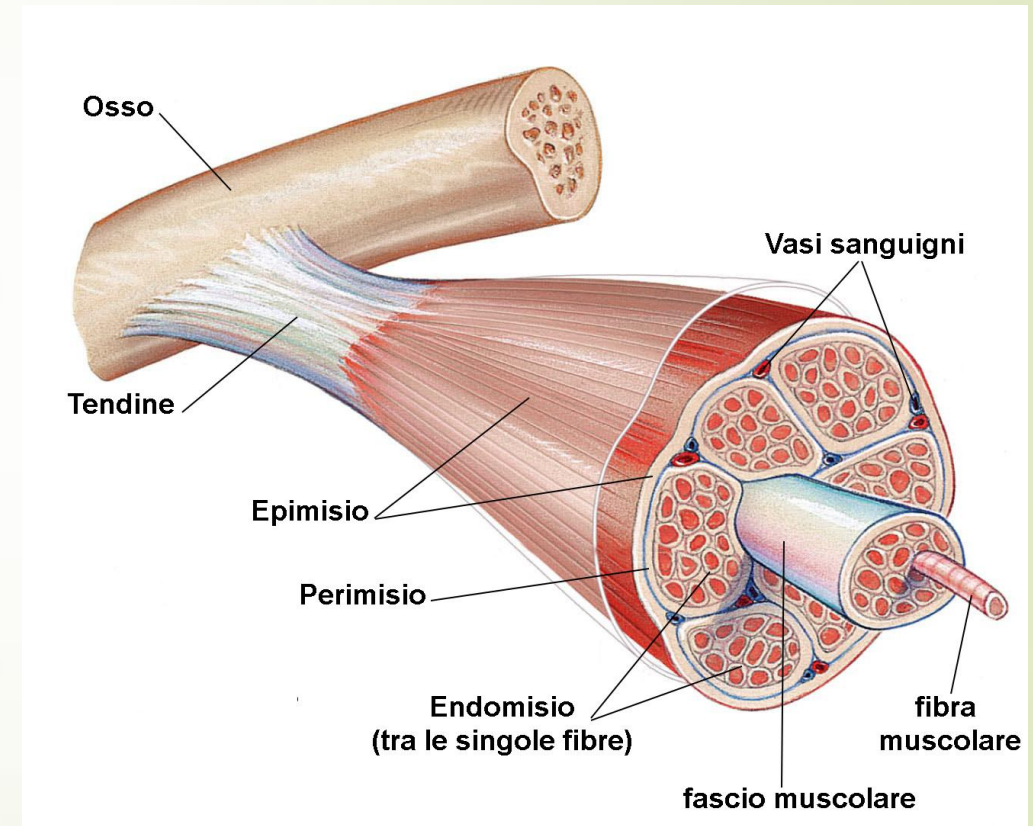
Ai vari elementi che costituiscono la muscolatura scheletrica sono associati dei rivestimenti di tessuto connettivo

Epimisio: avvolge l'intero muscolo

Perimisio: circonda gruppi costituiti da più fibre muscolari detti **fasci muscolari**

Endomisio: avvolge ciascuna fibra.

L'epimisio, il perimisio e l'endomisio si estendono oltre il muscolo proseguendo con il tendine, un cordone di tessuto connettivo regolare denso che collega il muscolo all'osso.

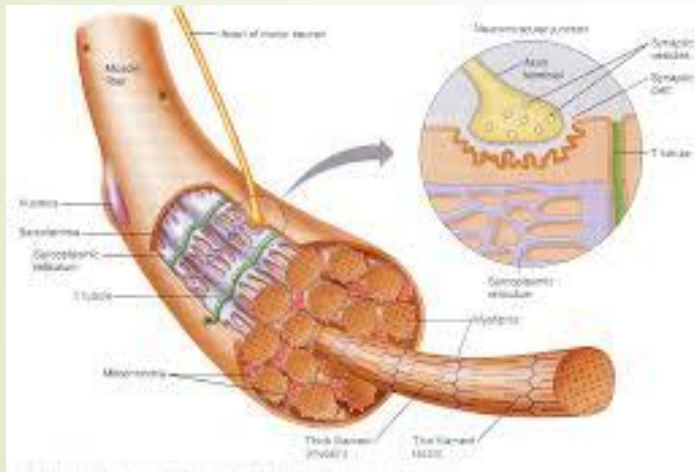


Innervazione e vascolarizzazione della muscolatura scheletrica

La contrazione di un muscolo richiede un enorme apporto di sangue per rifornire le fibre di nutrienti e ossigeno e per asportare i prodotti del suo metabolismo. In più, risulta fondamentale una innervazione che consenta di condurre l'impulso contrattile.

I muscoli scheletrici sono provvisti, pertanto, di nervi e vasi sanguigni e ogni nervo che penetra in un muscolo scheletrico è accompagnato da un'arteria e da una o due vene.

All'interno dell'endomisio, poi, ogni fibra muscolare è a contatto con uno o più capillari e con la porzione terminale di un neurone.

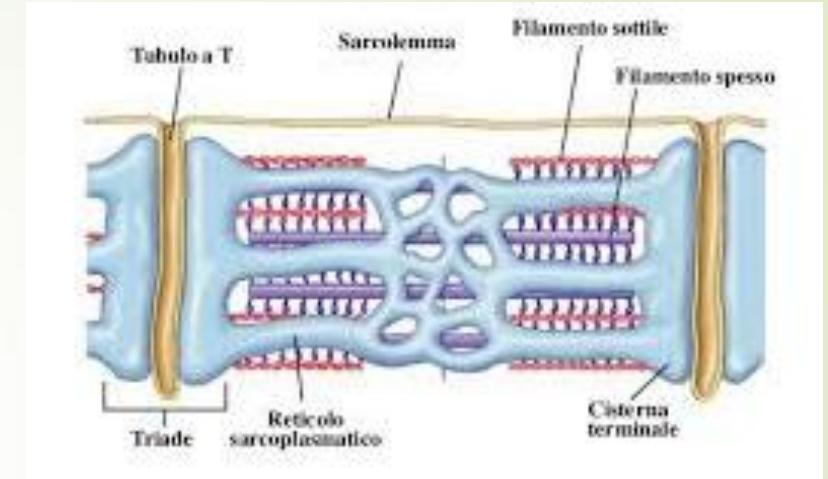


Fibre muscolari scheletriche

Si presentano quali grossi elementi cilindrici, con un diametro di 50 -100 micrometri plurinucleati in quanto derivati dalla fusione dei mioblasti

(1 $\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$)

I nuclei sono periferici, a ridosso del **sarcolemma**, la membrana cellulare, da cui si originano i tubuli trasversi (**tubuli T**) che penetrano all'interno della fibra



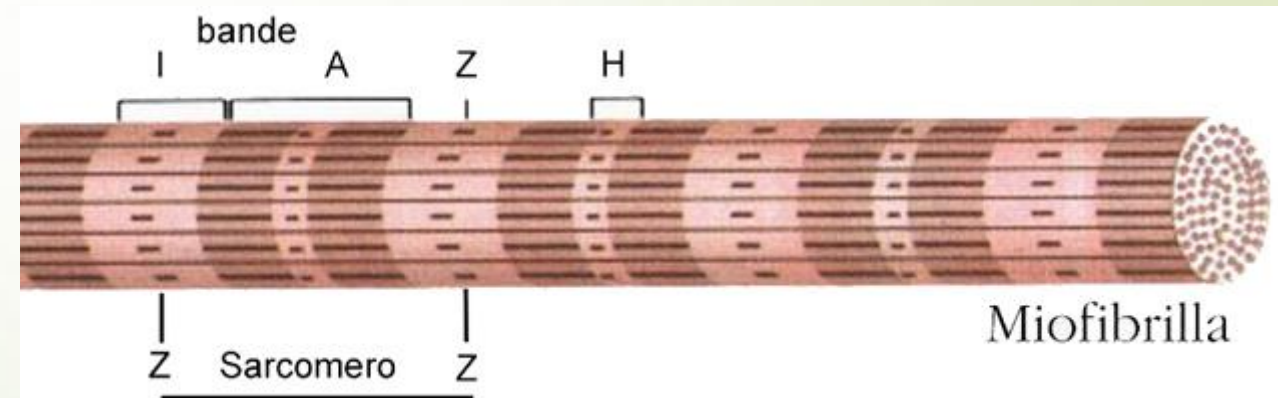
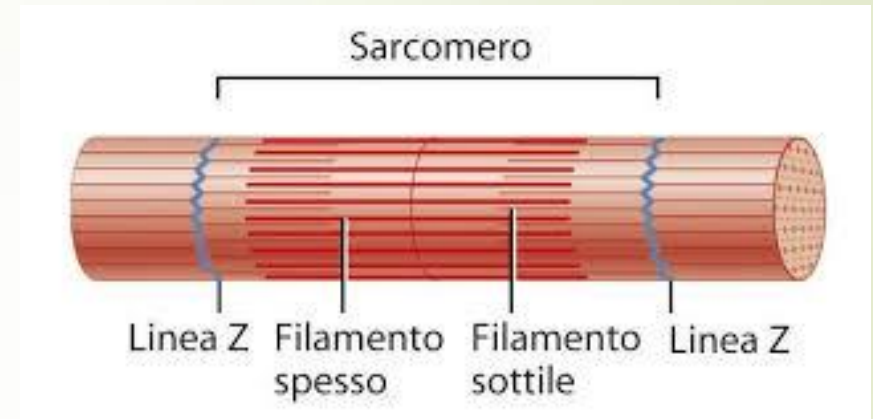
Il citoplasma, detto **sarcoplasma**, contiene un esteso **reticolo sarcoplasmatico**, simile al R.E.L., che immagazzina gli ioni Ca^{2+} fondamentali per la contrazione muscolare, molti mitocondri che producono ATP, numerose molecole di **mioglobina**.

La **mioglobina** è una piccola proteina globulare formata da una singola catena polipeptidica ripiegata intorno al gruppo eme. Ha la funzione di immagazzinare ossigeno, come riserva, per la produzione di ATP nei mitocondri. Ad essa si deve il colore rosso delle f. muscolari

Ogni fibra presenta due tipi di striature:

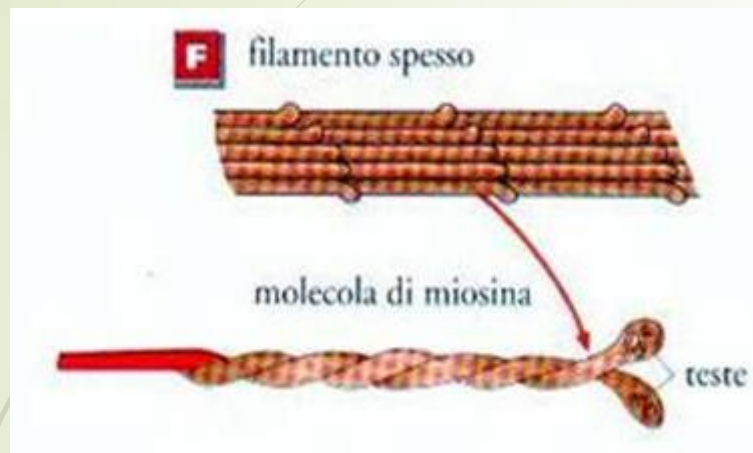
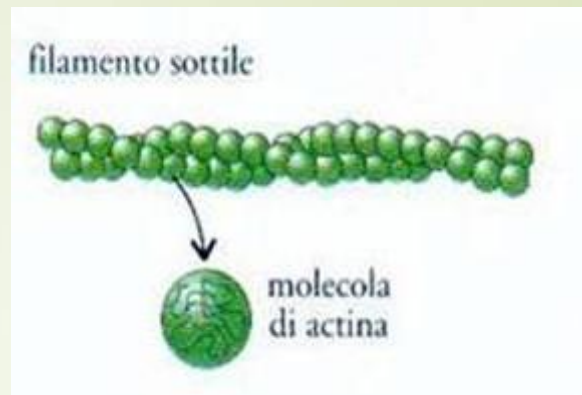
- **Striatura trasversale**: dovuta alla ripetizione ordinata dei **sarcomeri** lungo la miofibrilla, visibile in forma di un'alternanza di bande chiare (filamenti sottili di actina) e bande scure (filamenti spessi di miosina)

- **Striatura longitudinale** : dovuta alla presenza nel sarcoplasma delle **miofibrille**, associazioni di più sarcomeri, disposte parallelamente alla propria lunghezza



Il sarcomero e la sua struttura

Il **sarcomero** è l'unità funzionale del tessuto muscolare striato. Esso risulta costituito da due tipi di filamenti: quelli sottili e quelli spessi



I **filamenti spessi** sono costituiti da fasci di **miosina**, una proteina con una coda fibrosa e una testa globulare. Presentano enzimi con attività ATPasica, in grado di scindere l'ATP per fornire energia alla contrazione.

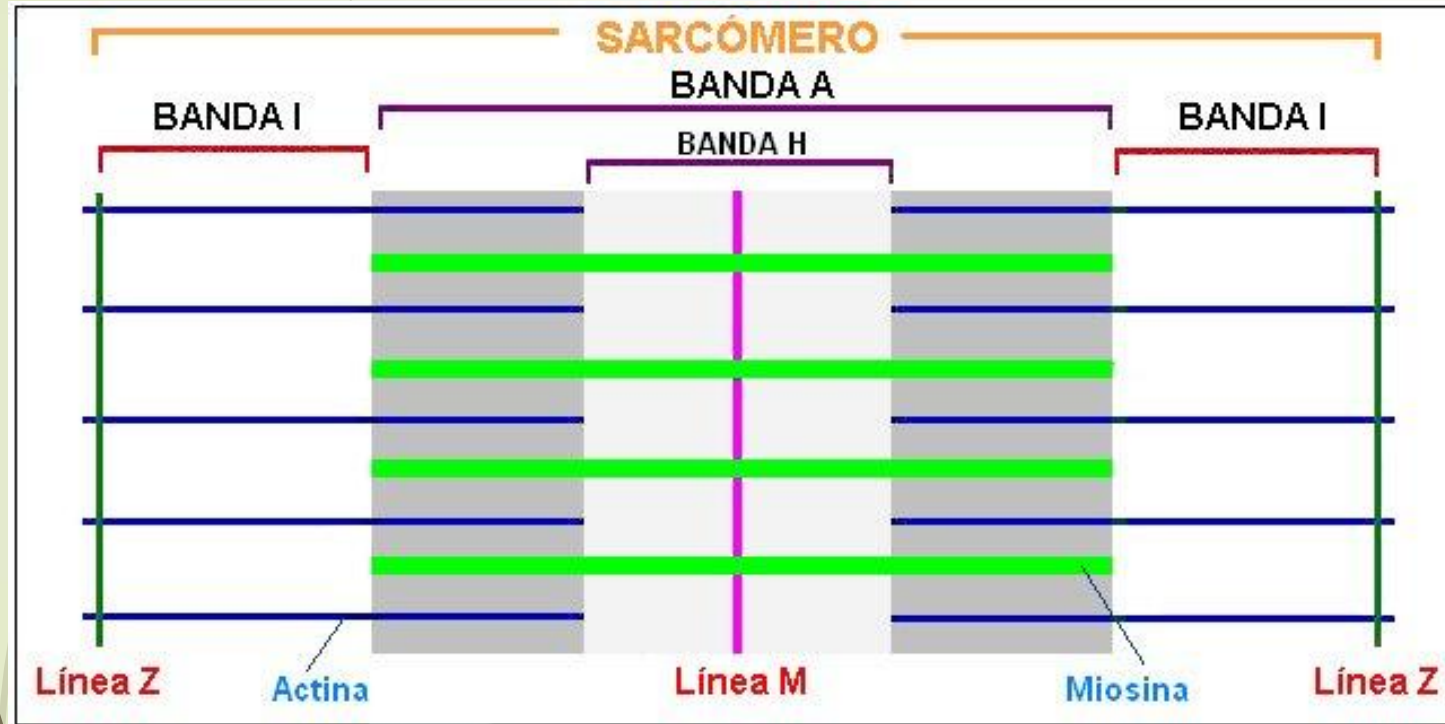
I **filamenti sottili** sono formati da tre proteine: **actina**, **tropomiosina** e **troponina**

L' **actina** è una proteina globulare in cui le singole molecole formano due filamenti che si avvolgono in una catena elicoidale.

Ogni molecola contiene un sito di legame al quale si può attaccare una testa miosinica

Troponina e **Tropomiosina** sono proteine regolatrici

La struttura del sarcomero



línea Z : una linea a zig-zag di materiale proteico che ancora due sarcomeri adiacenti

banda I: banda chiara formata solo da filamenti sottili di actina.

banda A : banda centrale del sarcomero ove, oltre alla actina è presente la miosina.

Al centro della banda A vi è una **banda H** : caratterizzata dalla sola presenza della miosina

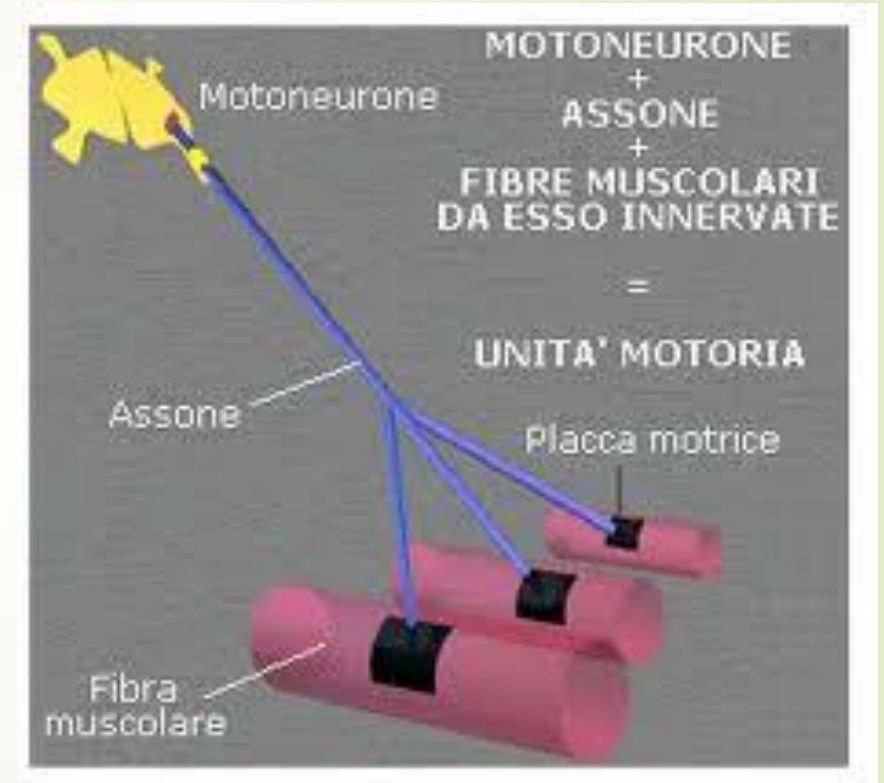
La contrazione del muscolo striato

Affinché si contragga, la fibra muscolare deve essere opportunamente stimolata da un impulso nervoso detto **potenziale di azione muscolare** generato da un **motoneurone**.

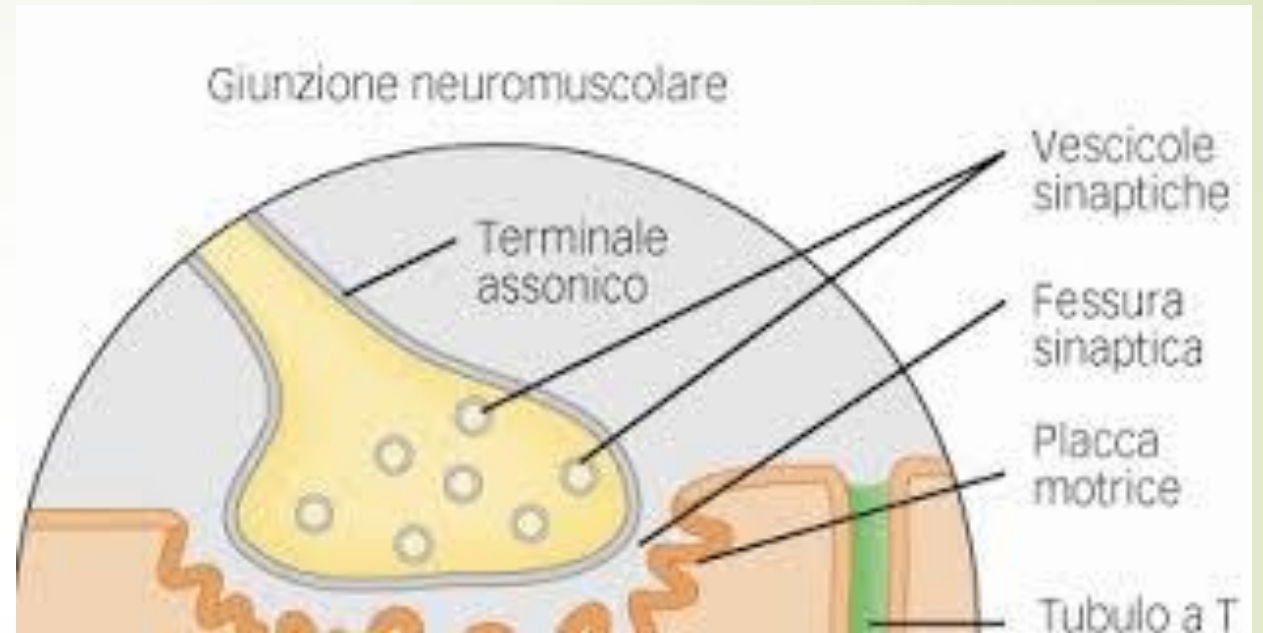
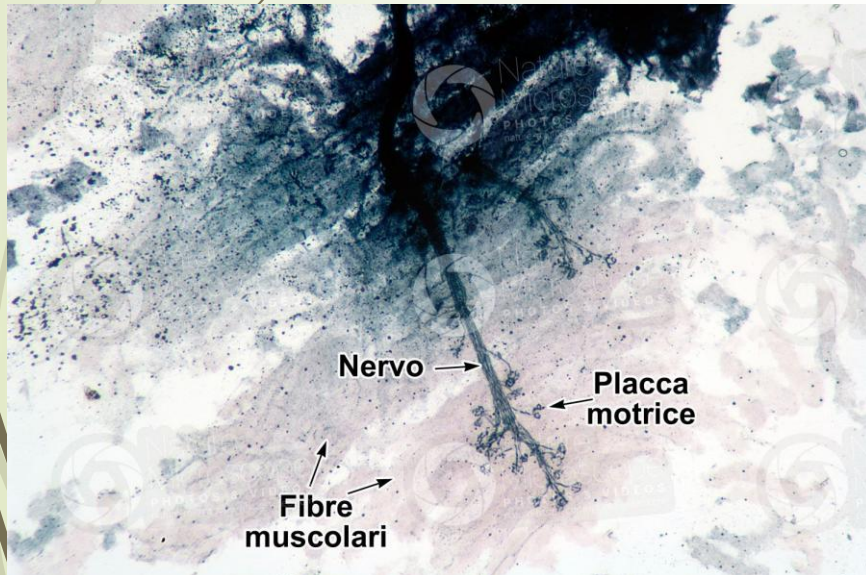
Il motoneurone, insieme alle fibre da esso stimulate, costituisce un' unità motoria, l'unità funzionale minima dell'apparato neuromuscolare.

Le fibre muscolari appartenenti a una medesima unità si contraggono in maniera sincrona, secondo la legge del "tutto o nulla".

I muscoli che controllano movimenti di precisione hanno 10- 20 fibre per unità motoria, quelli che controllano movimenti ampi fino a 2000-3000 fibre.

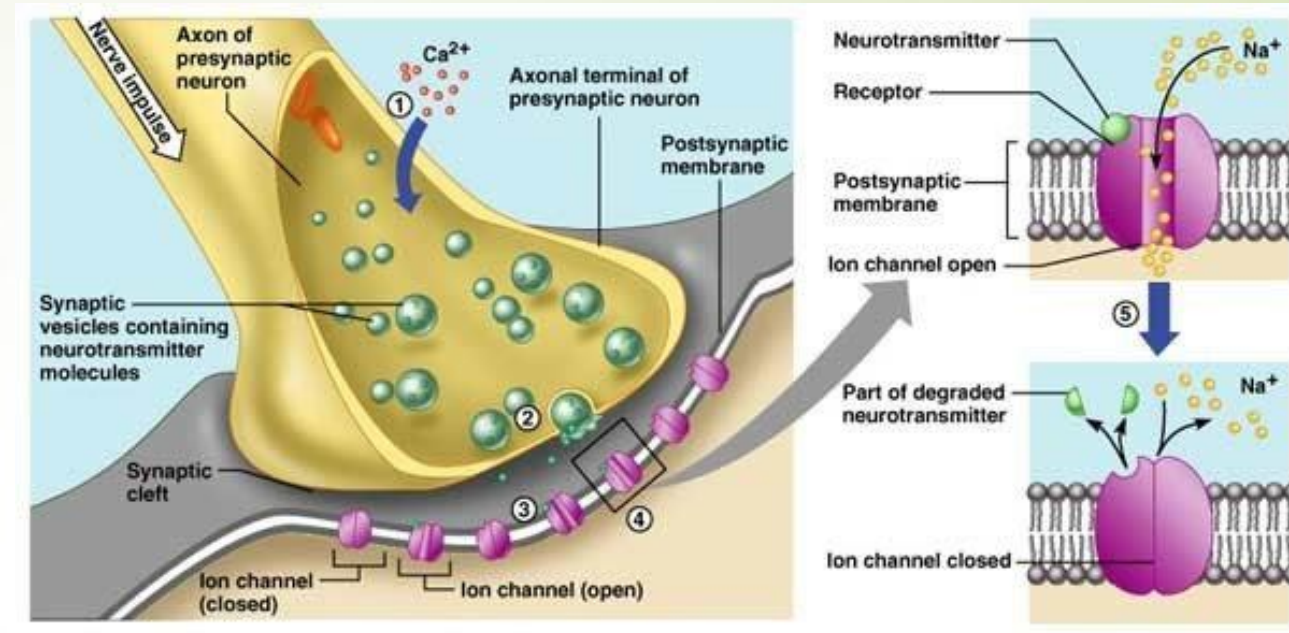


L'assone del motoneurone, avvicinandosi al muscolo si ramifica e le sue terminazioni formano piccole espansioni dette **bottoni sinaptici**, contenenti vescicole ripiene di acetilcolina (ACh), un neurotrasmettitore.



La zona del sarcolemma vicina al terminale assonico è detta **placca motrice** e la sinapsi che si forma tra i terminali assonici del motoneurone e la placca motrice della fibra muscolare è detta **giunzione neuromuscolare**.

L'arrivo dell'impulso nervoso ai bottoni sinaptici determina il rilascio dell'acetilcolina nello spazio sinaptico, che, legandosi ai recettori della placca motrice i quali agiscono da canali ionici del Na^+ , permettono agli ioni Na^+ di penetrare all'interno della fibra.



Il flusso di ioni Na^+ genera il **potenziale di azione muscolare** che si propaga dal sarcolemma al sistema dei tubuli trasversi, causando l'apertura dei canali per il rilascio degli ioni Ca^{2+} dal reticolo sarcoplasmatico nel sarcoplasma.

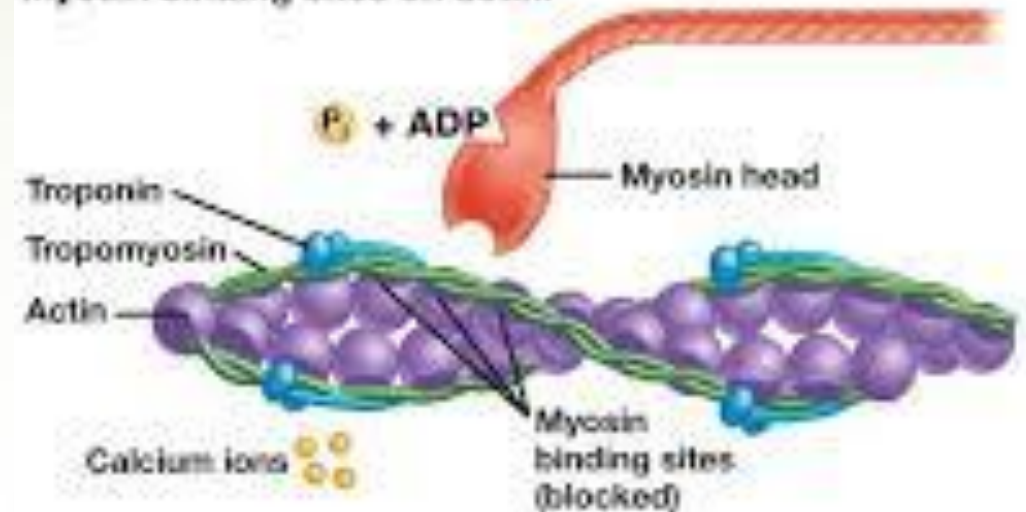
L'acetilcolina viene rapidamente degradata dall'acetilcolinesterasi, non permettendo un ulteriore ingresso di ioni Na^+ e garantendo, in tal modo, il rilassamento della fibra.

Gli ioni Ca^{2+} , liberati dal reticolo sarcoplasmatico, esplicano la loro azione a livello dei filamenti sottili dove i siti di legame sui filamenti di actina per la miosina sono normalmente mascherati da molecole di troponina e di tropomiosina.

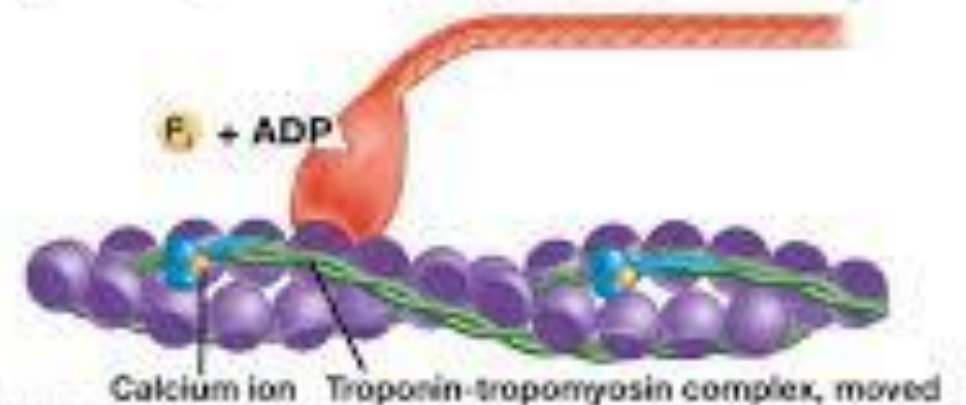
Lo ione Ca^{2+} si combina con le molecole di troponina producendo lo scivolamento delle catene di tropomiosina e modificando la conformazione dell'actina, che provoca la liberazione dei siti di legame per la miosina.

Quando i siti di legame risultano scoperti inizia il ciclo di contrazione.

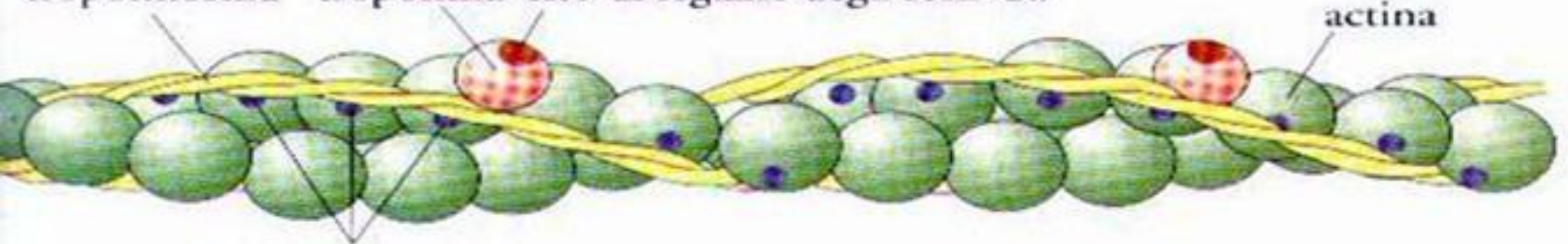
(a) Tropomyosin and troponin work together to block the myosin binding sites on actin.



(b) When a calcium ion binds to troponin, the troponin-tropomyosin complex moves, exposing myosin binding sites.

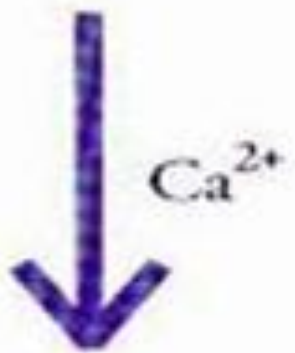


tropomiosina troponina sito di legame degli ioni Ca^{2+}

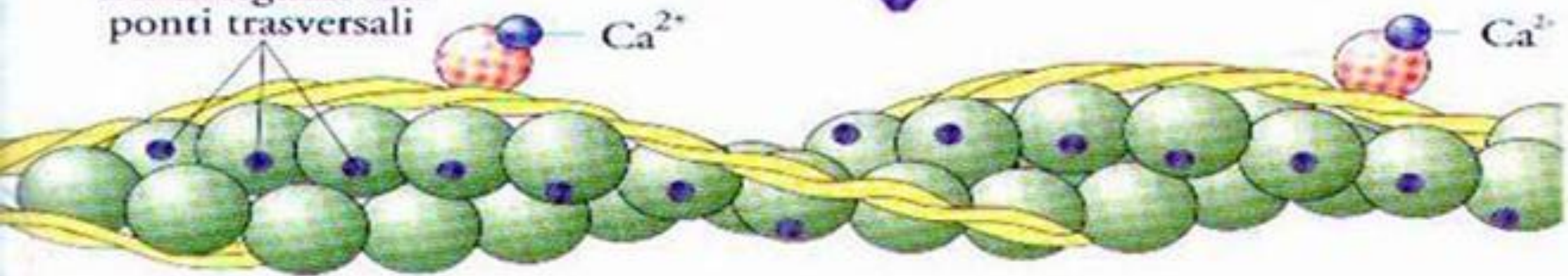


actina

siti di legame dei ponti trasversali

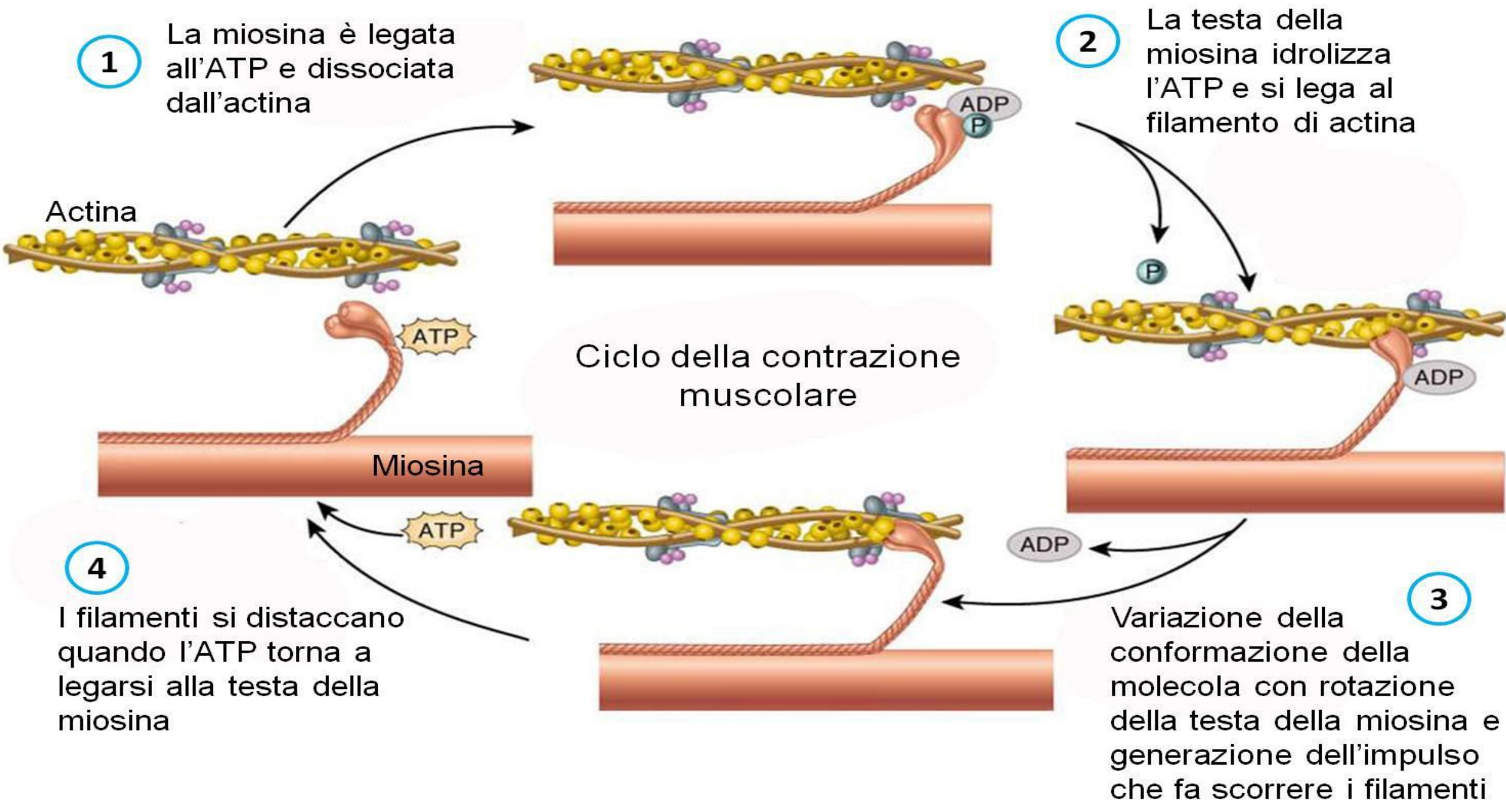


siti di legame dei ponti trasversali



Ca^{2+}

Ca^{2+}



1

La miosina è legata all'ATP e dissociata dall'actina

Actina

ATP

Miosina

2

La testa della miosina idrolizza l'ATP e si lega al filamento di actina

P

ADP

4

I filamenti si distaccano quando l'ATP torna a legarsi alla testa della miosina

ATP

ADP

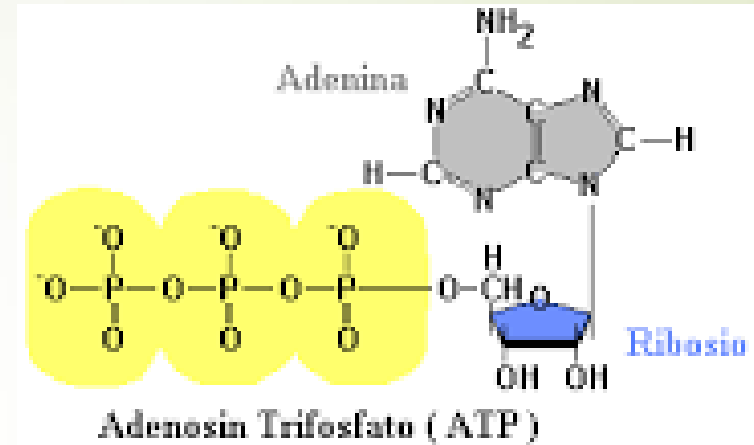
3

Variazione della conformazione della molecola con rotazione della testa della miosina e generazione dell'impulso che fa scorrere i filamenti

Ciclo della contrazione muscolare

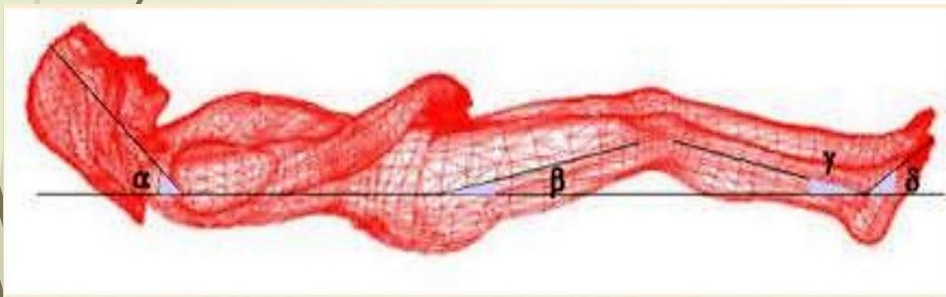
Il ruolo dell'ATP nella contrazione

L'ATP è essenziale per la contrazione dei sarcomeri, infatti l'idrolisi dell'ATP da parte della miosina fornisce l'energia per interagire con l'actina, far scorrere il filamento sottile e distaccarsene.



Qualora l'apporto dell'ATP dovesse mancare, actina e miosina resterebbero stabilmente legate tra loro. Ciò accade poche ore dopo la morte nei cadaveri in cui il persistere dei ponti trasversali provoca una rigidità muscolare detta **rigor mortis**

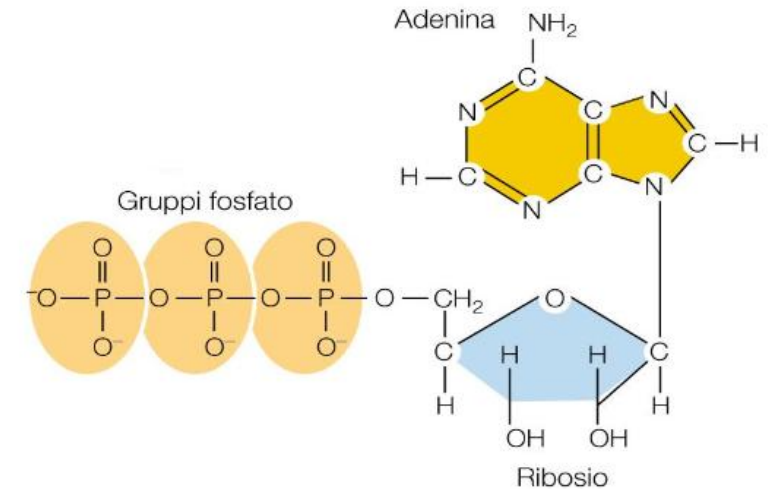
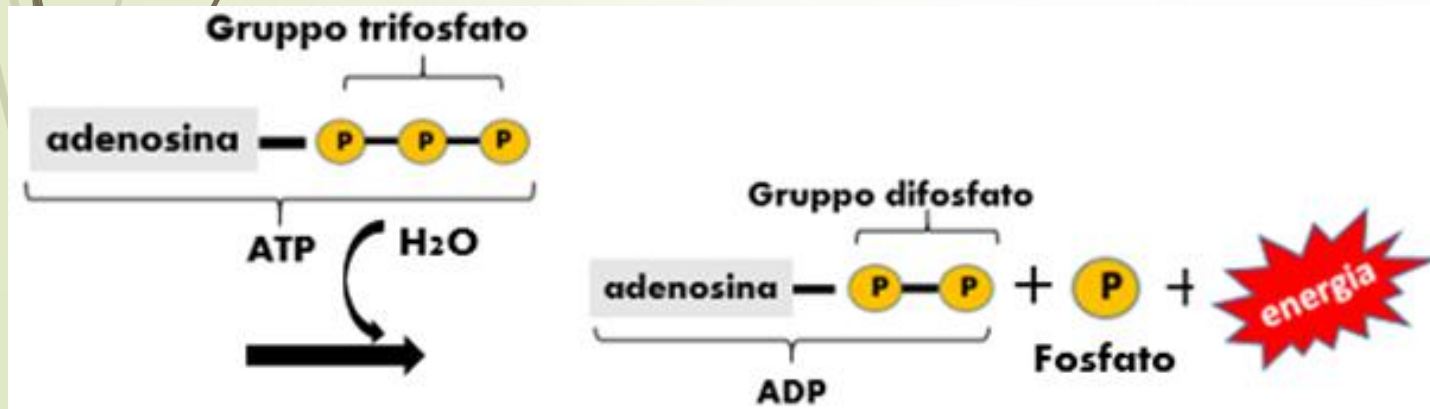
Tale rigidità scompare circa 24 ore dopo, quando gli enzimi lisosomiali scindono i ponti trasversali.



Il metabolismo muscolare

Per entrare in contrazione, il muscolo ha bisogno di una quantità di energia notevolmente superiore a quella che gli occorre per il suo normale metabolismo e l'ATP presente nelle fibre a riposo è sufficiente a fornire energia per i primi secondi di attività muscolare.

Se l'attività prosegue occorre produrre altro ATP che, scisso in ADP e P, libera energia che viene convertita nell'energia meccanica della contrazione muscolare

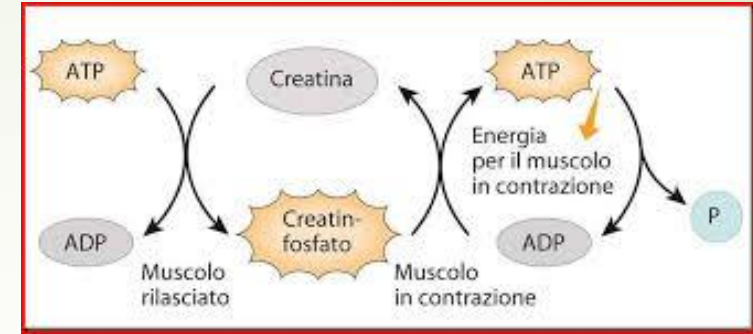


Le fibre muscolari dispongono di tre fonti per la produzione di ATP:

- Il **creatinfosfato** per i primi 15 secondi
- La **respirazione cellulare anaerobica** (glicolisi) per 30 - 40 secondi
- La **respirazione cellulare aerobica** per attività muscolare superiore al mezzo minuto

ATP dal creatinfosfato o fosfocreatina

A riposo le fibre scheletriche producono più ATP del necessario e parte di tale ATP in eccesso viene utilizzato per la produzione di creatinfosfato (CP) ricco di energia, tramite fosforilazione della creatina, una piccola molecola sintetizzata nel fegato, nei reni e nel pancreas



Quando il muscolo è in contrazione, per sforzi superiori ai 10 - 15 secondi, il creatinfosfato accumulato nel citosol si scinde in creatina e radicale fosforico e quest'ultimo si unisce all'ADP per formare rapidamente ATP dal quale si ricava energia per la contrazione.

Fosfocreatina + ADP → creatina + ATP reazione di Lohman catalizzata dall'enzima creatinchinasi

Questo sistema energetico adoperato dal muscolo per produrre ATP è detto **meccanismo anaerobico lattacido**

L'organismo esegue questo processo di "carico" e "scarico" della creatina in quanto la molecola di fosfocreatina è piccola ed occupa poco spazio. L'ATP, infatti, è molto più ingombrante e, pertanto, in tal modo è possibile accumulare la massima quantità di energia nel minor spazio possibile

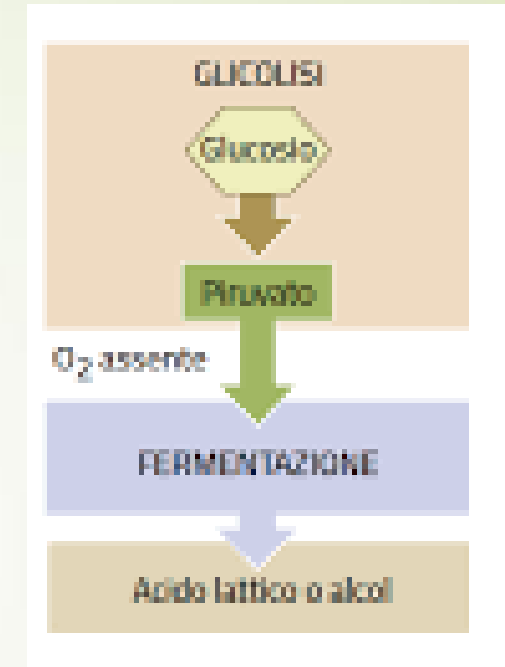
N.B. Ogni giorno poco meno del 2% della creatina totale (circa 2 g) presente nell'organismo è trasformata in **creatinina**, sostanza che viene escreta dal rene

ATP dalla glicolisi e dalla respirazione aerobica

Superati i 15 secondi, il creatinfosfato si esaurisce e la fonte di energia successiva è la **glicolisi**, che fornisce energia sufficiente per circa 30 - 40 secondi di attività muscolare.

Il glucosio, proveniente dal sangue o dalla scissione diretta del glicogeno muscolare, è scisso in due molecole di piruvato, liberando ATP.

Quando i livelli di ossigeno sono bassi, l'acido piruvico si trasforma in acido lattico nella **fermentazione lattica**



L'attività muscolare prolungata dipende, invece, dalla **respirazione cellulare aerobica** che produce ATP nei mitocondri utilizzando ossigeno



I tipi di fibre muscolari scheletriche

I muscoli scheletrici contengono tre tipi di fibre, presenti in proporzioni variabili:

1. **Rosse o ossidative lente**
2. **Bianche o glicolitiche rapide**
3. **Intermedie o ossidative - glicolitiche rapide**

1. Fibre rosse o ossidative lente

- rosse perché ricche di mioglobina e riccamente irrorate
- presentano molti mitocondri
- fibre di piccole dimensioni
- generano ATP soprattutto grazie alla respirazione cellulare aerobica
- lente in quanto si contraggono e si rilassano più lentamente delle fibre rapide
- possono sostenere contrazioni prolungate, sviluppando, tuttavia, forze limitate

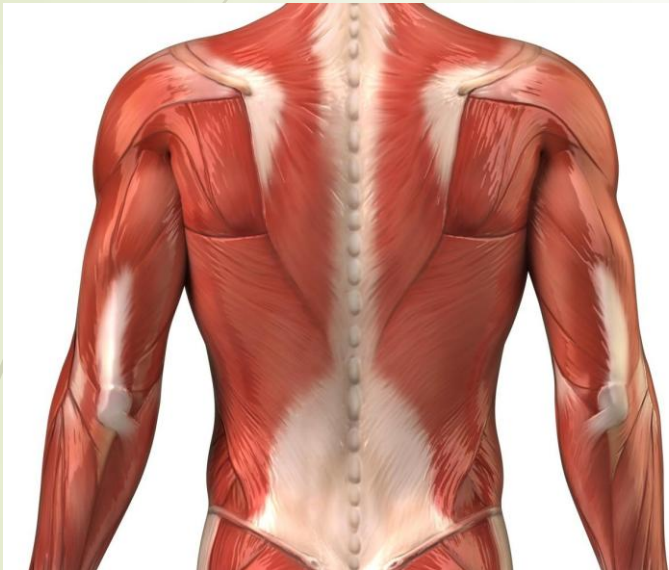
2- Fibre glicolitiche rapide o fibre bianche

- bianche, in quanto presentano un basso contenuto di mioglobina e pochi capillari
- presentano pochi mitocondri
- fibre di grandi dimensioni
- glicolitiche in quanto generano ATP attraverso la glicolisi anaerobica
- ultrarapide, in quanto producono contrazioni vigorose e veloci
- affaticamento rapido, servendo per movimenti intensi ma di breve durata

3. Fibre intermedie o ossidative - glicolitiche rapide

- elementi di diametro intermedio rispetto ai tipi precedenti
- colore rosso per la presenza di grandi quantità di mioglobina e di una discreta densità capillare
- producono una quantità notevole di ATP attraverso la respirazione cellulare aerobica ma generano ATP anche grazie alla glicolisi
- rapide, rispetto alle fibre ossidative lente, con una buona resistenza all'affaticamento

La maggior parte dei muscoli scheletrici è costituita da tutti e tre i tipi di fibre in proporzioni variabili a seconda dell'azione del muscolo, dell'attività fisica svolta e di fattori genetici.



I muscoli del dorso, del collo, delle gambe, che devono mantenere costantemente la postura, hanno alte percentuali di **fibre ossidative lente**



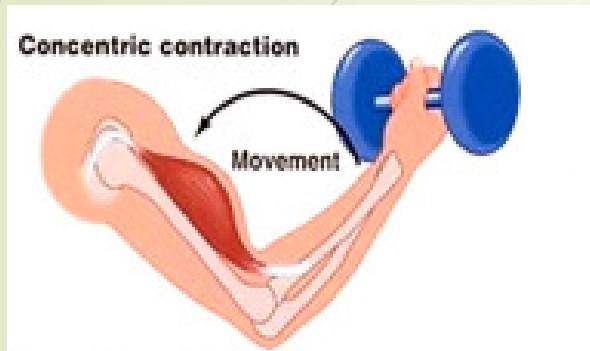
I muscoli delle braccia, usate ad intermittenza e brevemente, per sviluppare grande tensione, hanno un'alta percentuale di **fibre glicolitiche rapide**



I muscoli delle gambe, che oltre a sostenere il corpo servono anche per camminare e correre, hanno sia **fibre ossidative lente** che **ossidative -glicolitiche rapide**.

La contrazione muscolare

I muscoli possono dar vita a diverse tipologie di contrazione e, tra queste, la **Contrazione isotonica** e la **Contrazione isometrica**



Nelle **contrazioni isotoniche** la tensione sviluppata dal muscolo rimane pressoché costante e il muscolo cambia di lunghezza.

Queste contrazioni sono utilizzate per i movimenti del corpo o per spostare oggetti

Nelle **contrazioni isometriche** la tensione generata non basta a superare la resistenza dell'oggetto da muovere e la lunghezza del muscolo non cambia.

Queste contrazioni sono importanti per mantenere la postura e sostenere oggetti in posizione fissa



Il sistema muscolare scheletrico e origine ed inserzione del muscolo

Il sistema muscolare scheletrico è costituito da quasi 700 muscoli, organi composti da vari tessuti, che comprendono il tessuto muscolare scheletrico, il tessuto nervoso e vari tipi di tessuto connettivo.



L'attacco del muscolo all'osso fisso è detto **origine**.

La porzione carnosa è definita **ventre**.

L'altra estremità è ancorata in un punto detto **inserzione**.

I muscoli scheletrici e il movimento

I movimenti sono resi possibili perché molti muscoli lavorano in gruppo.

A seconda che essi agiscano nel provocare un movimento nello stesso senso o in senso opposto, i muscoli scheletrici vanno distinti in:

Sinergici e **Antagonisti**

I **muscoli sinergici** operano insieme generando un movimento nello stesso senso.
(es. il **bicipite brachiale**, il **brachiale** ed il **brachioradiale** nel generare la flessione dell'avambraccio sul braccio)



I **muscoli antagonisti** lavorano in coppia con azioni opposte (es. il **bicipite** e il **tricipite** nel generare la **flessione** e, in contrapposizione, l'**estensione** dell'avambraccio sul braccio)

Il muscolo che produce l'azione si chiama **agonista**. Quando l'agonista si contrae l'**antagonista** si rilaschia.

I movimenti fondamentali

Abduzione, adduzione, flessione, estensione, supinazione, pronazione, rotazione



I muscoli che provocano tali movimenti vengono detti:

abduzioni,
adduttori,
flessori,
estensori,
rotatori,
supinatori,
pronatori

Aspetto

- cellule piccole di forma fusata con nucleo singolo centrale di forma ovale
- presenza di filamenti intermedi, oltre a filamenti spessi e sottili che non si sovrappongono in maniera regolare, non generando la striatura tipica del t. muscolare striato e del t. muscolare cardiaco
- i filamenti sottili e i filamenti intermedi si presentano ancorati a strutture dette **corpi densi**, che in parte sono liberi nel sarcoplasma e in parte sono legati al sarcolemma.

Sede

- pareti di organi interni (tubo digerente, utero, vescica...) e dei vasi sanguigni

Funzione

- forma la muscolatura involontaria
- ha una contrazione più lenta e duratura rispetto al tessuto striato
- durante la contrazione, lo scorrimento dei filamenti di actina e di miosina genera una tensione che viene trasmessa ai filamenti intermedi, i quali esercitano una trazione sui corpi densi ancorati al sarcolemma, producendo l'accorciamento della fibra

Muscolo liscio a unità multipla

- Si trova nelle pareti delle grandi arterie, nelle grandi vie aeree, nei muscoli erettori del pelo, nei muscoli interni dell'occhio
- Consiste di fibre singole, ciascuna con fibre nervose motorie situate alle estremità
- La stimolazione di una singola fibra fa contrarre solo la fibra interessata

Muscolo liscio viscerale o unitario

- Si trova nelle pareti di piccole arterie, vene, organi cavi (stomaco, intestino, utero e vescica)
- Le fibre sono interconnesse da giunzioni comunicanti e formano un reticolo continuo
 - Quando un ormone o un neurotrasmettitore stimola una fibra, il potenziale d'azione si trasmette alle fibre vicine che si contraggono in contemporanea come una singola unità

La contrazione del t. muscolare liscio

- inizia più lentamente e dura più a lungo in quanto gli ioni calcio entrano con lentezza nelle fibre muscolari lisce, uscendone altrettanto lentamente, ritardando, in tal modo, il rilassamento e generando il tono del muscolo liscio, uno stato di contrazione parziale continua.
- Il muscolo liscio si può accorciare ed allungare molto di più degli altri tipi di muscoli (capacità espansiva di organi cavi come utero, stomaco e vescica)
- La maggior parte delle fibre si contrae e si rilassa in risposta a
 - **impulsi nervosi** provenienti dal sistema nervoso autonomo
 - **stiramento meccanico**
 - **ormoni** (es. ossitocina a livello di muscolatura uterina)
 - **variazioni di pH, di temperatura, di ossigeno e di biossido di carbonio**

Il tessuto muscolare cardiaco e le sue caratteristiche

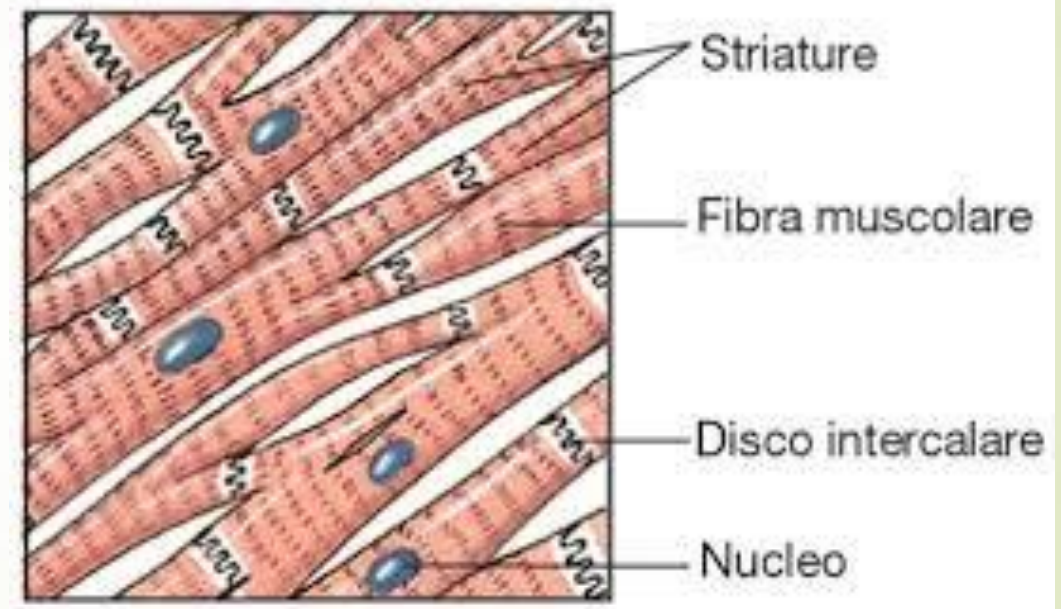
Al pari del **t. muscolare scheletrico** è costituito da:

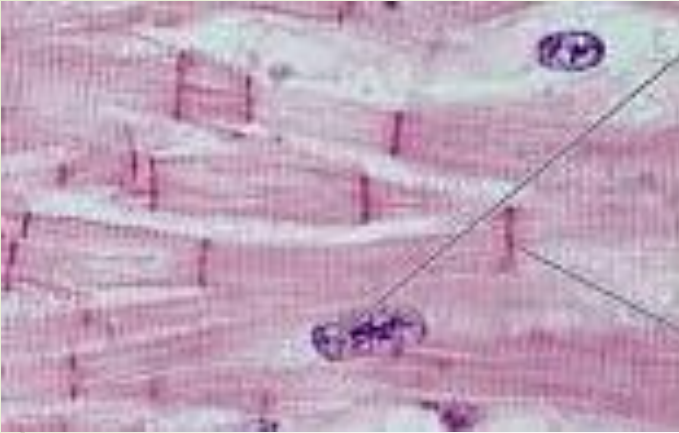
Elementi ben distinti

Elementi con evidente striatura

ed è in grado di fornire una rapida e potente
contrazione

Al pari del **t. muscolare liscio** del tipo viscerale o unitario, si comporta da **sincizio funzionale**, contraendosi, infatti, quale fosse una singola fibra ed è **involontario**

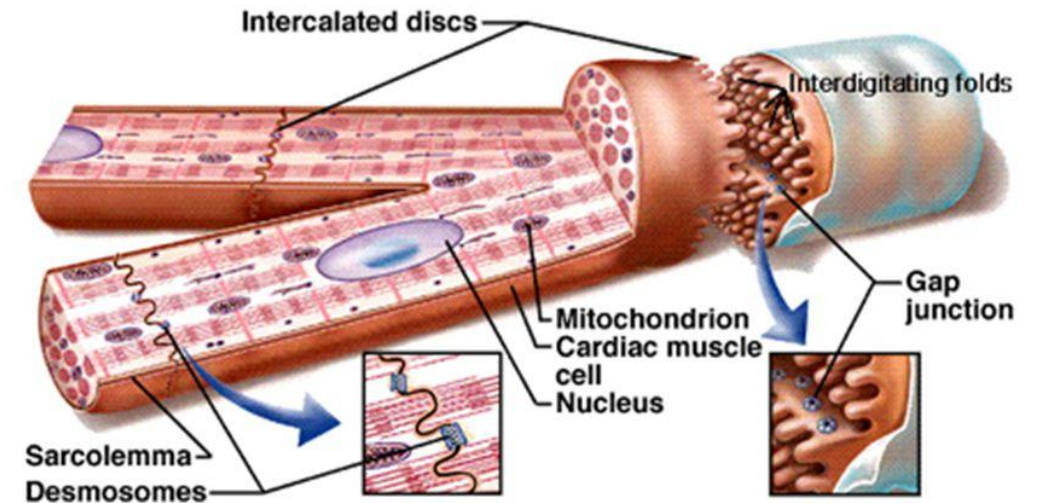




Le fibre della muscolatura cardiaca

- sono ramificate, più corte e di diametro maggiore rispetto a quelle della muscolatura scheletrica
- hanno un solo nucleo centrale
- sono interconnesse tramite i **dischi intercalari** i quali contengono giunzioni cellulari comunicanti che permettono ai potenziali d'azione di passare rapidamente da una fibra cardiaca all'altra
- Hanno mitocondri più numerosi e più grandi rispetto alle fibre scheletriche
- Producono ATP soprattutto per **respirazione aerobica**

Le fibre muscolari cardiache



Il tessuto muscolare cardiaco è costituito da cellule muscolari mononucleate di forma irregolare (spesso a Y), connesse da giunzioni specializzate, trasversali, costituenti i dischi intercalari.

La contrazione del t. muscolare cardiaco

Il miocardio si contrae senza l'intervento di una stimolazione nervosa. Sono, infatti, presenti alcune fibre muscolari cardiache specializzate (**miocardio specifico**) che agiscono da stimolatori per l'inizio di ogni contrazione

- Il ritmo automatico delle contrazioni cardiache è detto **autoritmicità**
- Il ritmo cardiaco è influenzato da numerosi ormoni e neurotrasmettitori che lo accelerano o lo rallentano
- In condizioni di riposo, il cuore si contrae e si rilassa in media 75 volte al minuto

