



ELEMENTI DI FISIOLOGIA

dott. Alessandro Ganzini

I SISTEMI ENERGETICI

Movimento → conversione energia chimica in energia meccanica

Carboidrati, proteine e grassi contengono energia chimica.

Catabolismo:

processo di scissione delle grandi molecole in molecole più piccole.

Libera energia chimica.



Il processo inverso, detto **anabolismo**.
Richiede energia chimica.



Metabolismo:

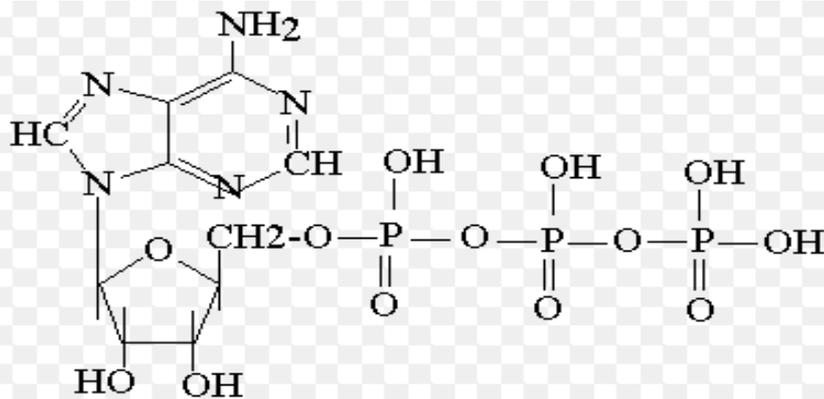
somma di tutte le reazioni che avvengono nel corpo

L'energia chimica ottenuta dalle reazioni cataboliche viene usata per sostenere reazioni anaboliche grazie ad una molecola intermedia

l'adenosina trifosfato (ATP)

E' composta da **adenosina + 3 gruppi fosfato**

Adenosina: adenina (base azotata)+ ribosio (zucchero a 5 atomi di carbonio)

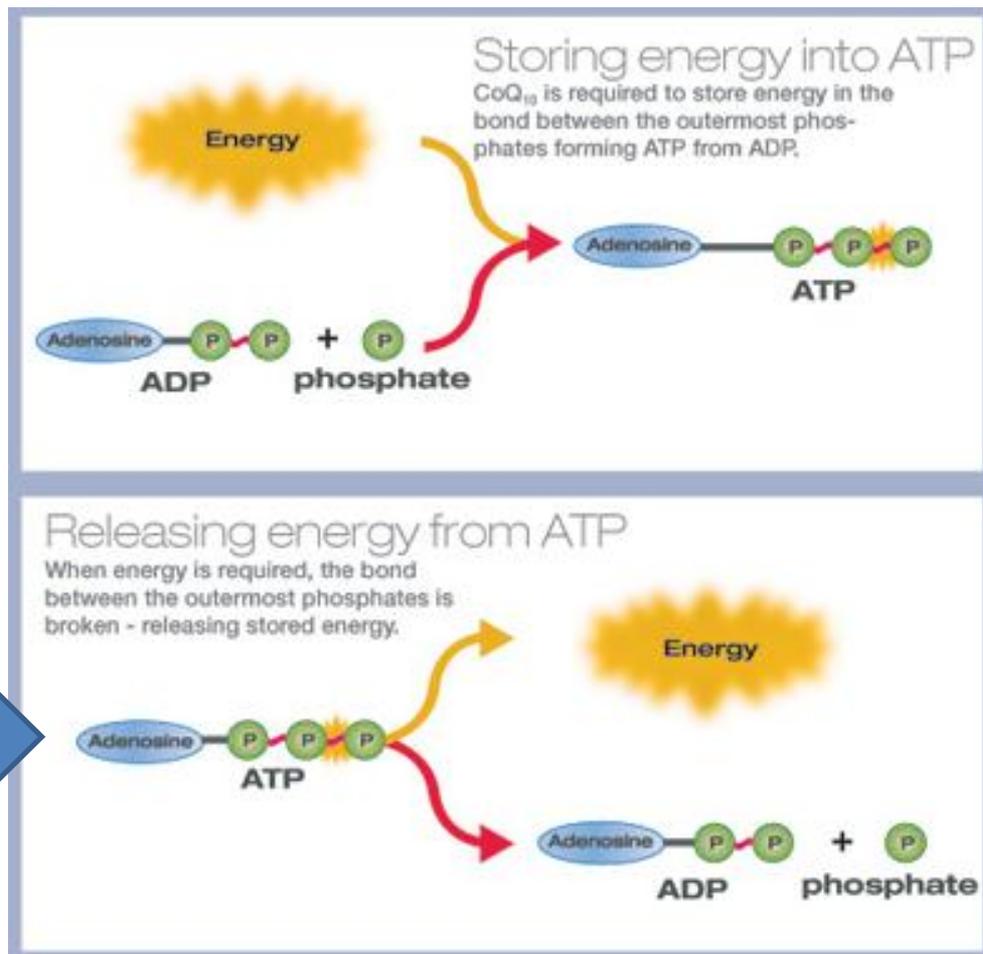


adenosine triphosphate (ATP)



L'enzima **miosina ATPasi** catalizza la reazione di **scissione dell'ATP**

La scissione dell'ATP **sostiene** la quasi **totalità** dei **processi vitali**



Senza ATP la contrazione muscolare non può avvenire.

Le cellule muscolari immagazzinano quantità limitate di ATP, esauribili in pochi istanti.

E' necessario un apporto costante di ATP.

Un allenatore deve sapere come l'esercizio influisce sull'utilizzo e sulla risintesi dell'ATP.

Sistemi energetici

Esistono **3 sistemi**
per generare nuovo ATP:

- 1) Aerobico o ossidativo
- 2) Anaerobico lattacido o glicolisi anaerobica
- 3) Anaerobico alattacido o sistema del fosfageno

Il metabolismo di base

Il sistema aerobico è il **metabolismo energetico di base**.

Sostiene la maggior parte delle attività quotidiane.
A riposo sostiene la quasi totalità dell'ATP prodotto.

In caso di surplus energetico intervengono anche i metabolismi anaerobici → accessori

Capacità e potenza

Capacità:

- quantità di **energia disponibile**
- grandezza del serbatoio



Potenza:

- quantità d'**energia utilizzabile nell'unità di tempo**
- diametro del rubinetto



Il metabolismo anaerobico alattacido

Fonte principale di ATP per **attività brevi** e ad **alta intensità**

(ma è attivo all'inizio di ogni attività indipendentemente dall'intensità)

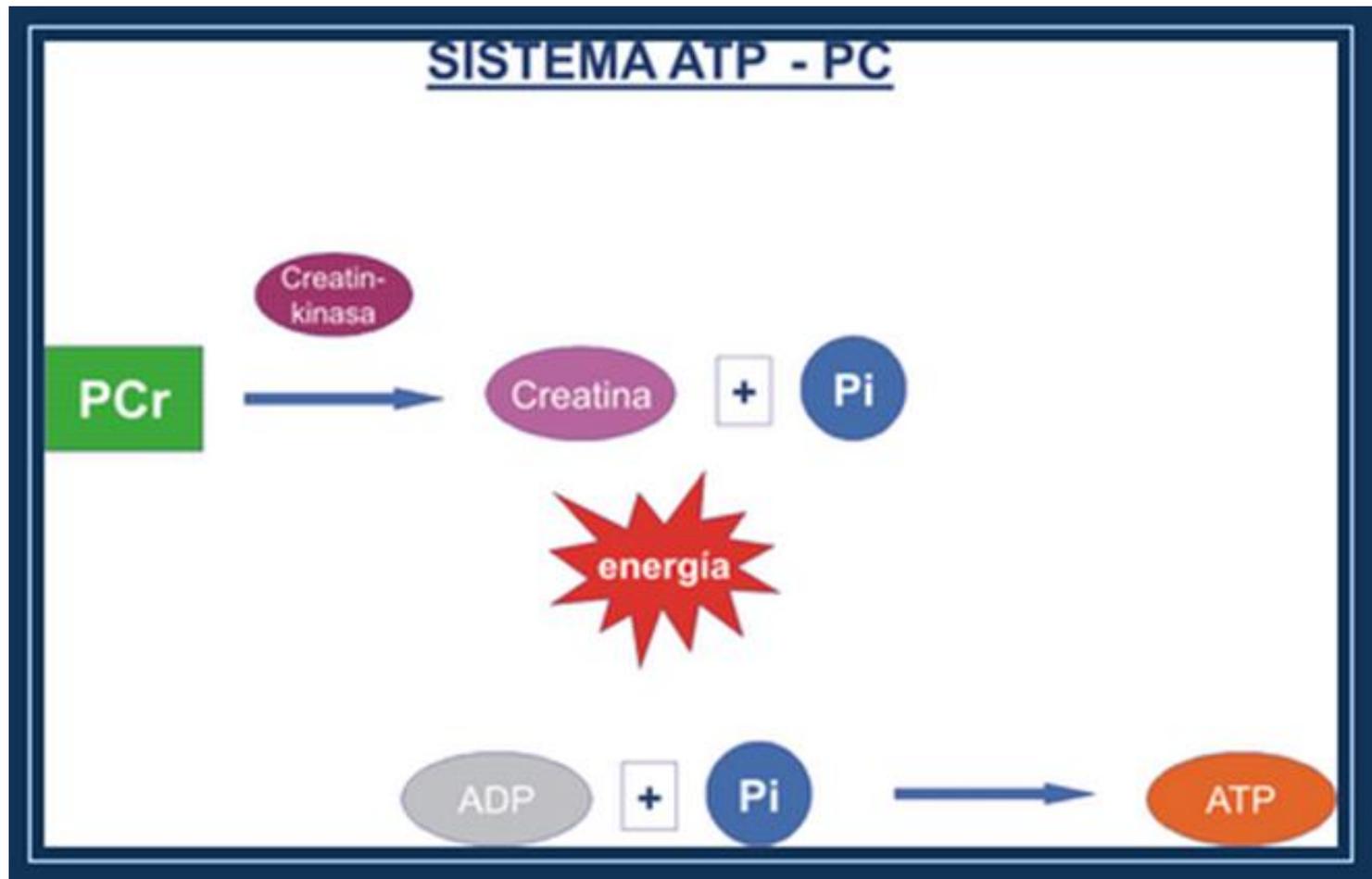
E' una fonte rapida ma limitata di energia

Potenza: elevata

Capacità: ridotta

Alla **massima potenza** permette di sostenere un esercizio di **6-10 secondi**

Risintetizza ATP tramite la **reazione di Lohmann**:



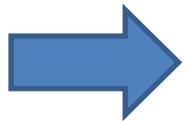
A riposo **Pcr** è presente in una **concentrazione 5 volte superiore all'ATP**, comunque limitata.

Tale reazione è **monoenzimatica** e molto **veloce**.

E' catalizzata dall'enzima **creatinafosfochinasi**

Per ogni molecola di PCr si ottiene una molecola di ATP.
Rapporto **1 a 1**.

E' una reazione **reversibile**.



Il ripristino delle scorte di PCr avviene rapidamente:
nei primi 30 sec di riposo si ripristina circa il 70%
e in 3-5 min il 100%

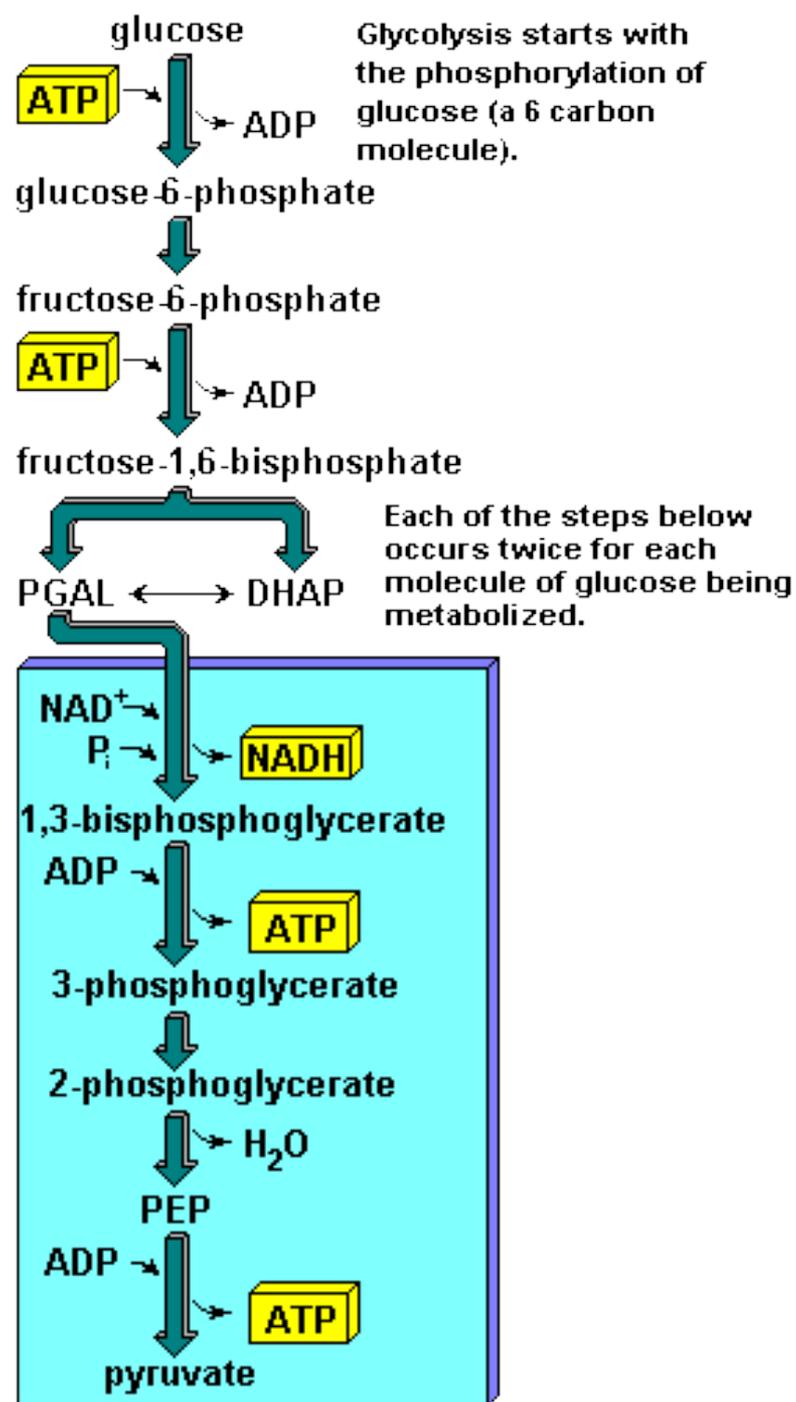
La glicolisi

Glucosio → acido piruvico + 2ATP

- **Avviene nel citoplasma** della cellula muscolare.
- E' una via multienzimatica, non è un'unica reazione.
- E' comune sia al metabolismo anaerobico lattacido che al metabolismo aerobico

L'acido piruvico o **piruvato** può subire **due destini differenti**:

In **presenza di ossigeno** (glicolisi aerobica) entra nel mitocondrio per sostenere il metabolismo aerobico altrimenti si verifica la (glicolisi anaerobica)

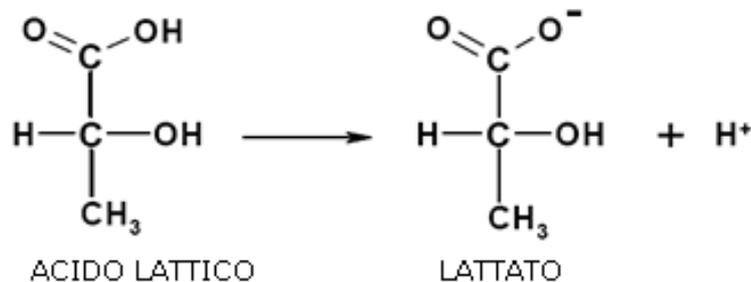


Il metabolismo anaerobico lattacido

Piruvato → acido lattico

Se il piruvato non riesce ad entrare nel mitocondrio l'enzima **lattato deidrogenasi** lo converte in **acido lattico**

L'acido lattico ($C_3H_6O_3$) nel sangue si dissocia in lattato ($C_3H_6O_2$) e H^+



Il metabolismo anaerobico lattacido

Alla massima potenza

permette di sostenere esercizi della durata di **40 sec** (es. 400m)

Il sistema ATP-CP fornisce energia per i primi 10 sec seguito dal sistema anaerobico lattacido.

L'energia proviene dai glucidi, principalmente dal glicogeno.

Potenza: media

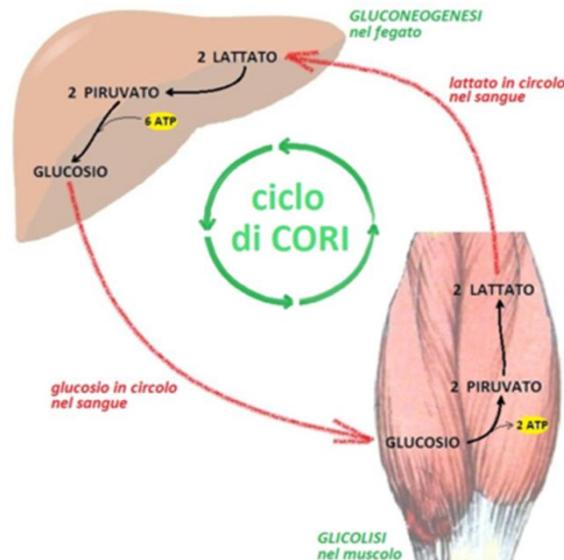
quanto acido lattico è possibile produrre nell'unità di tempo

Capacità: media

quanto riesco a tollerare alte concentrazioni di acido lattico

I destini del lattato

- Viene **ossidato** dai muscoli
- **Gluconeogenesi**: viene **riconvertito in glucosio** dal fegato (Ciclo di Cori) o dai reni



Il lattato è presente anche nel sudore ma è prodotto dalla cellula sudoripara non dal metabolismo muscolare

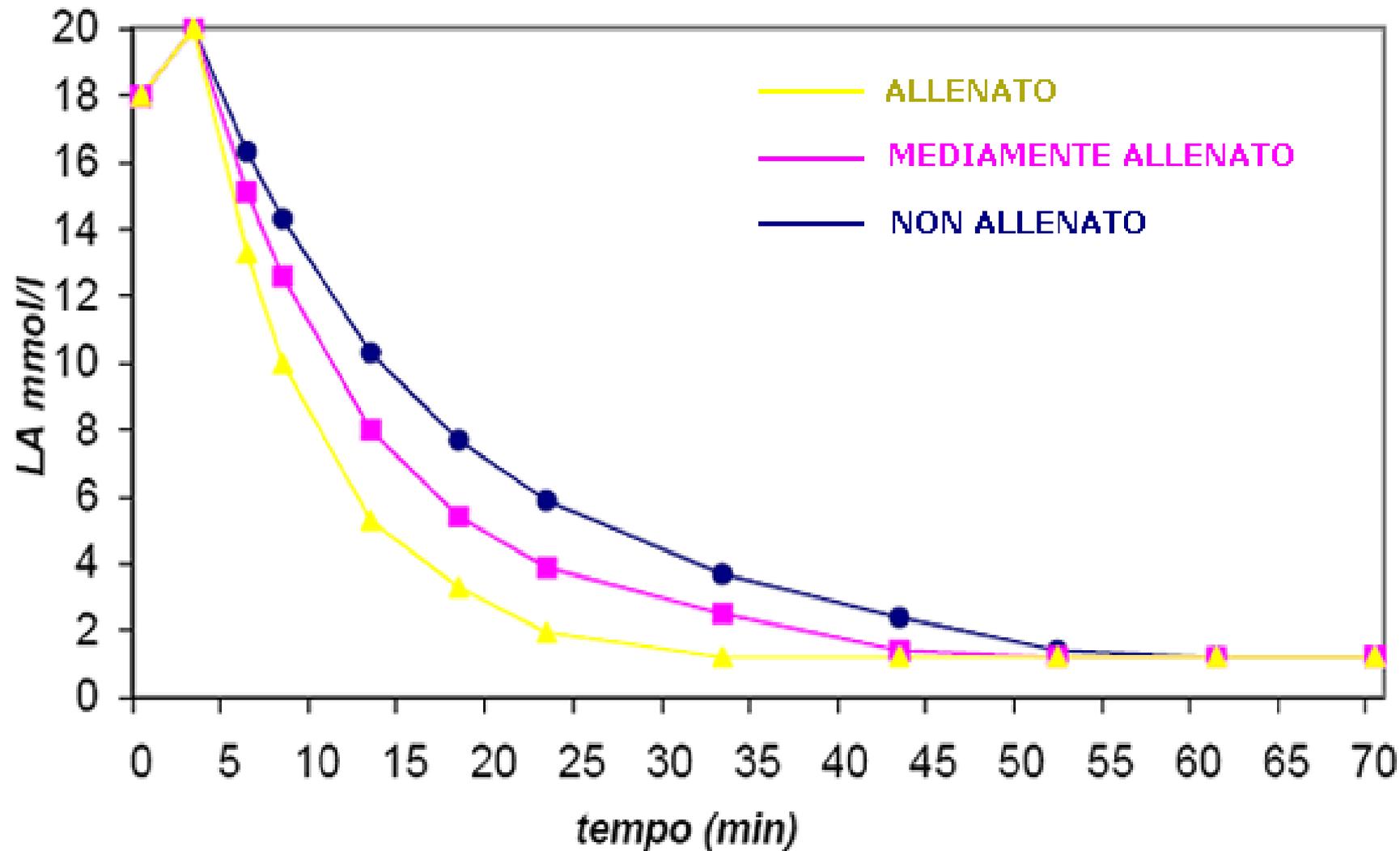
Tempi di smaltimento del lattato

Il lattato accumulato nel sangue necessita di diverso tempo per essere eliminato:

- **10 min** per rimuovere il **25%**
- **25 min** per rimuovere il **50%**
- **1 ora e 15 min** per rimuovere il **95%**.

La rimozione può essere facilitata con un recupero attivo.

Curva di smaltimento del lattato ematico a partire da un valore di riferimento di 20 mmol/L in soggetti allenati, mediamente allenati e non allenati



Il metabolismo aerobico (o ossidativo)

Avviene nel **mitocondrio**.

Ha **capacità elevatissima** e **bassa potenza** (VO₂max).

E' la fonte principale per **esercizi di durata superiore a 2 minuti**.

E' sostenibile **alla massima potenza** (VO₂ max)
per **6'** (4-8)

Il metabolismo aerobico sfrutta l'ossidazione di **grassi**, **carboidrati** ed in minor misura anche delle **proteine**.

L'ossidazione dei glucidi

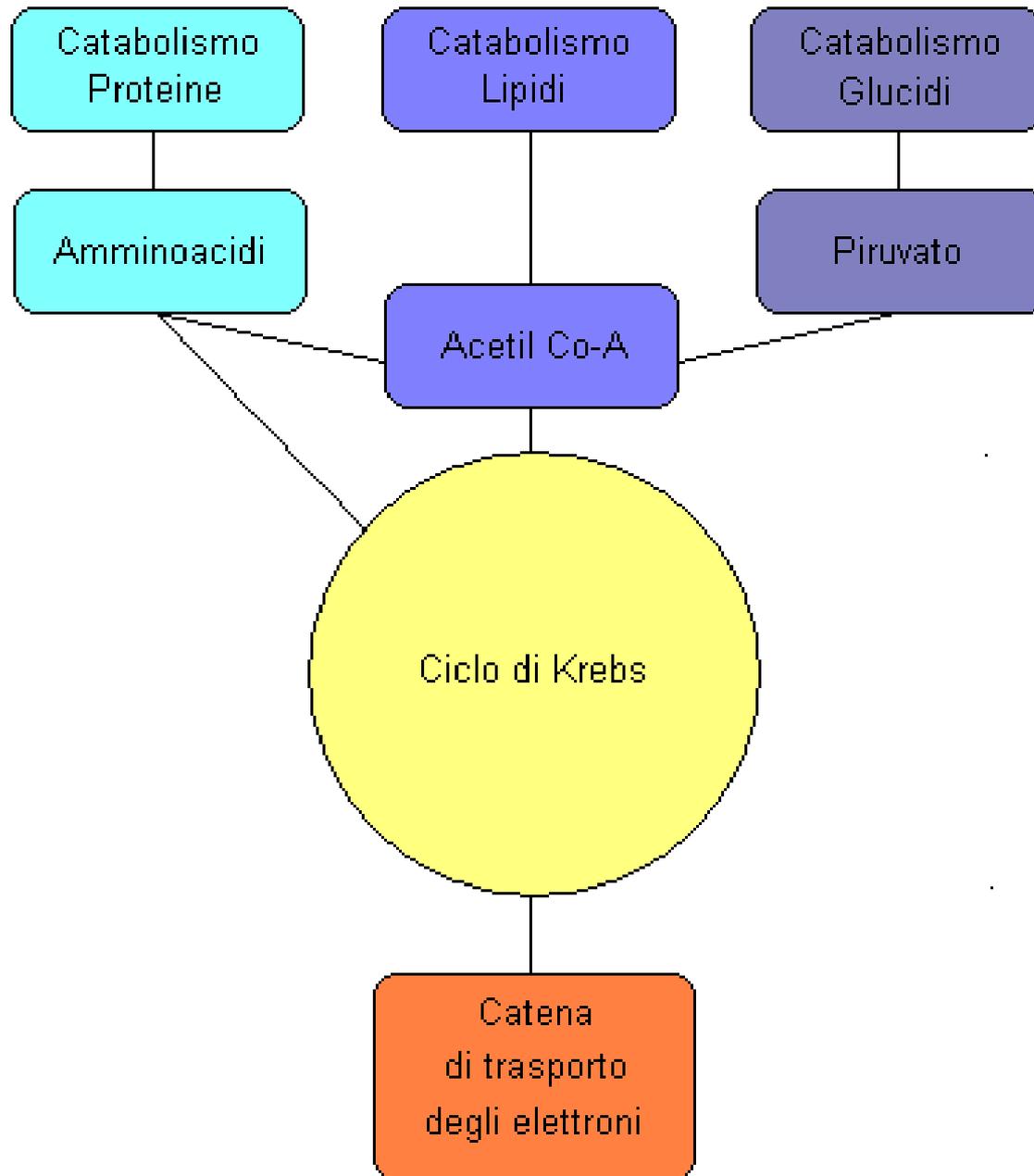
Il piruvato che entra nei mitocondri, viene completamente ossidato nel ciclo di Krebs che fornisce gli ioni H⁺ alla catena respiratoria necessari per produrre ATP.

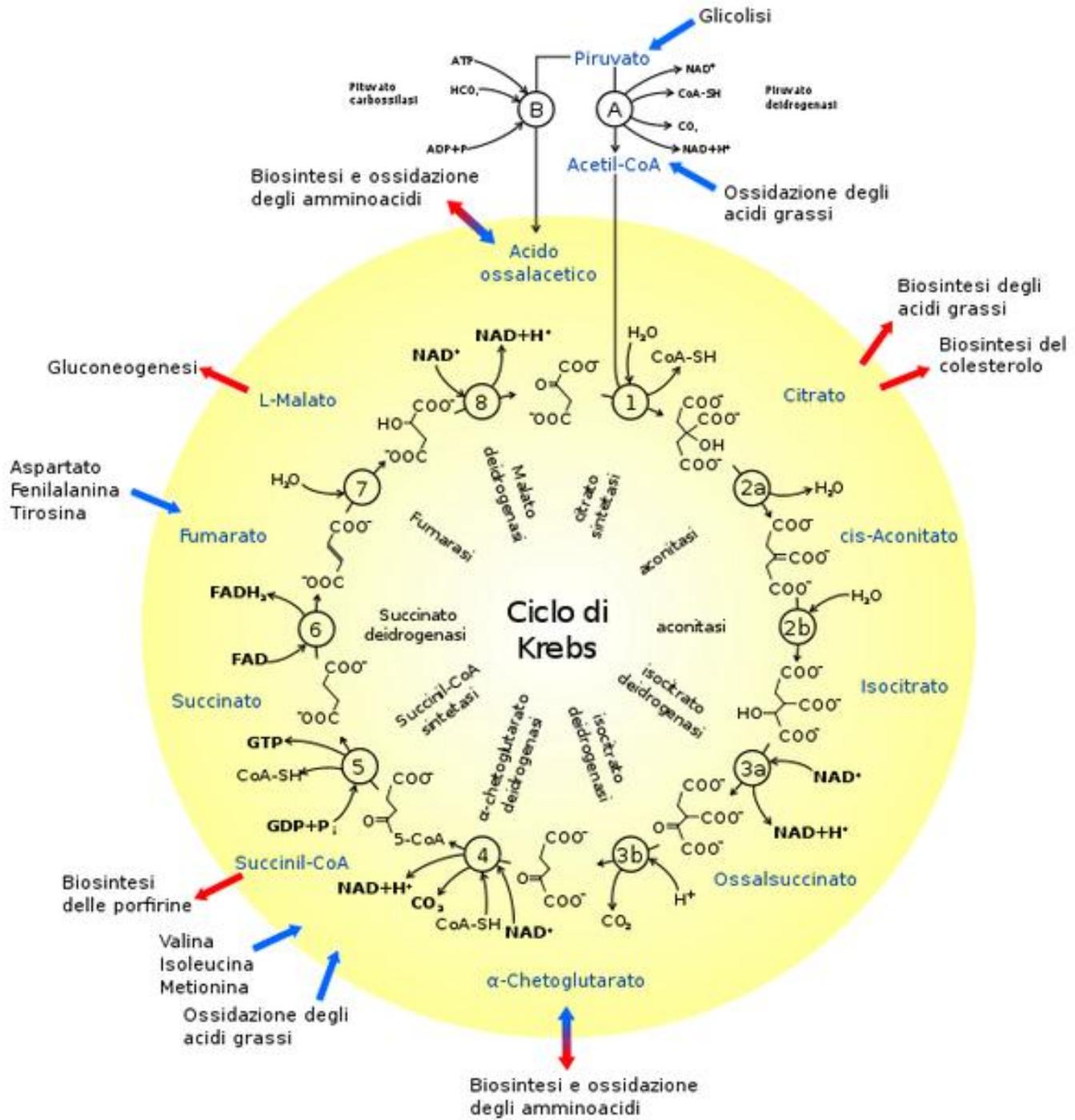
Il processo con cui la catena respiratoria produce ATP si dice: fosforilazione ossidativa

Il ciclo di Krebs e la fosforilazione ossidativa sono processi che avvengono in parallelo.

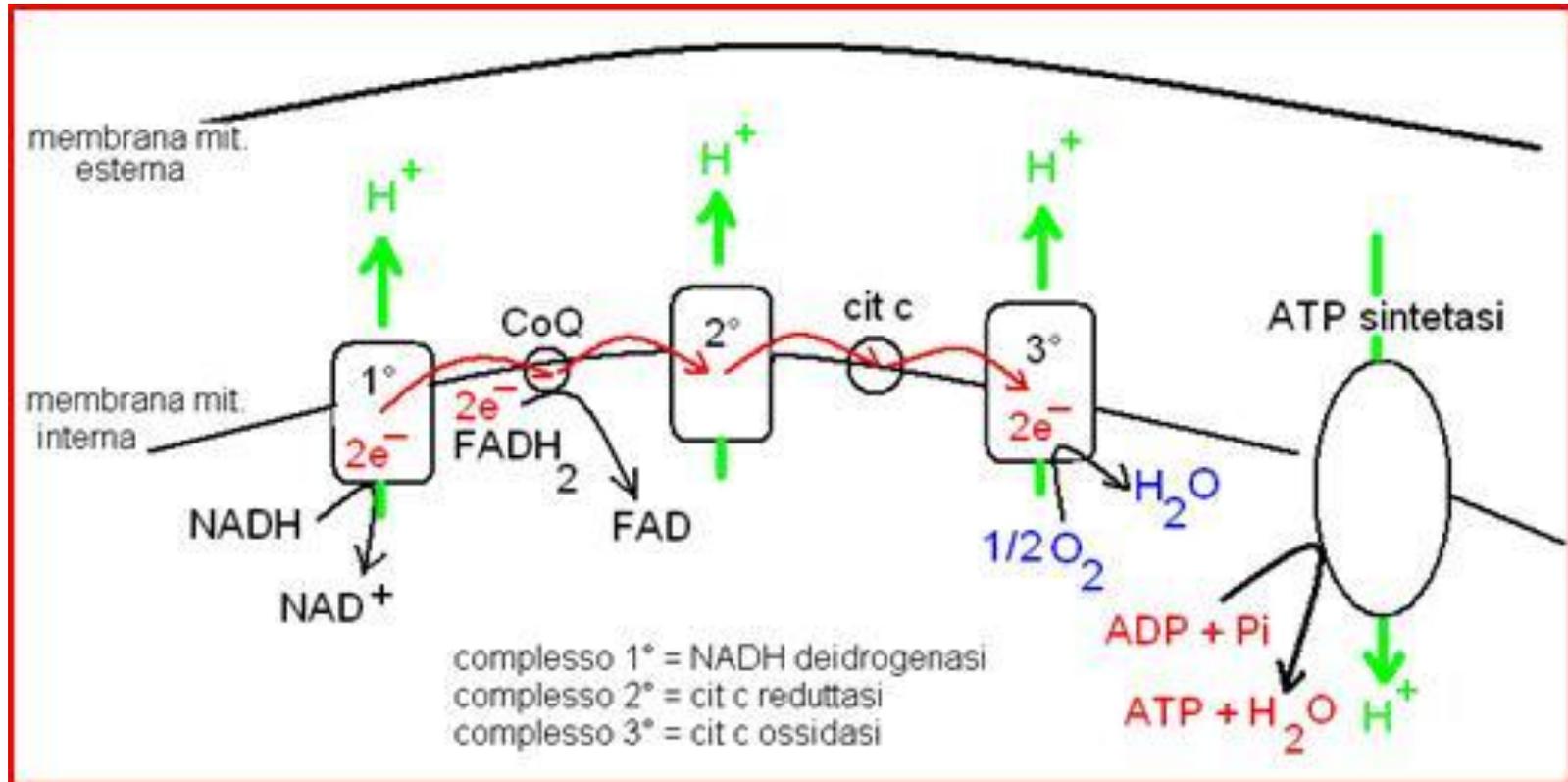
Per ogni molecola di piruvato che entra nel ciclo di Krebs vengono prodotte 36 molecole di ATP dalla catena respiratoria.

Quindi da una molecola di glucosio si possono ottenere un totale di 38 molecole di ATP.





La catena di trasporto degli elettroni o fosforilazione ossidativa



I carboidrati

vengono convertiti a glucosio
che prende la via della **glicolisi aerobica**

I grassi

sono accumulati nella cellula adiposa sotto forma di
trigliceridi,

l'enzima **lipasi** li separa in **glicerolo** e **acidi grassi**.

Gli acidi grassi **sono trasportati fino al mitocondrio.**

con la **beta ossidazione** sono convertiti ad **acetil-coA** e atomi
di idrogeno.

Le proteine

sotto forma di alcuni **aa** possono essere **convertite in glucosio**
o entrare, a vari livelli, direttamente nel Ciclo di Krebs.

La betaossidazione è un processo lento.

L'ossidazione dei glucidi avviene più velocemente ma è meno vantaggiosa:

le scorte di glicogeno sono limitate, mentre quelle degli acidi grassi sono molto maggiori.

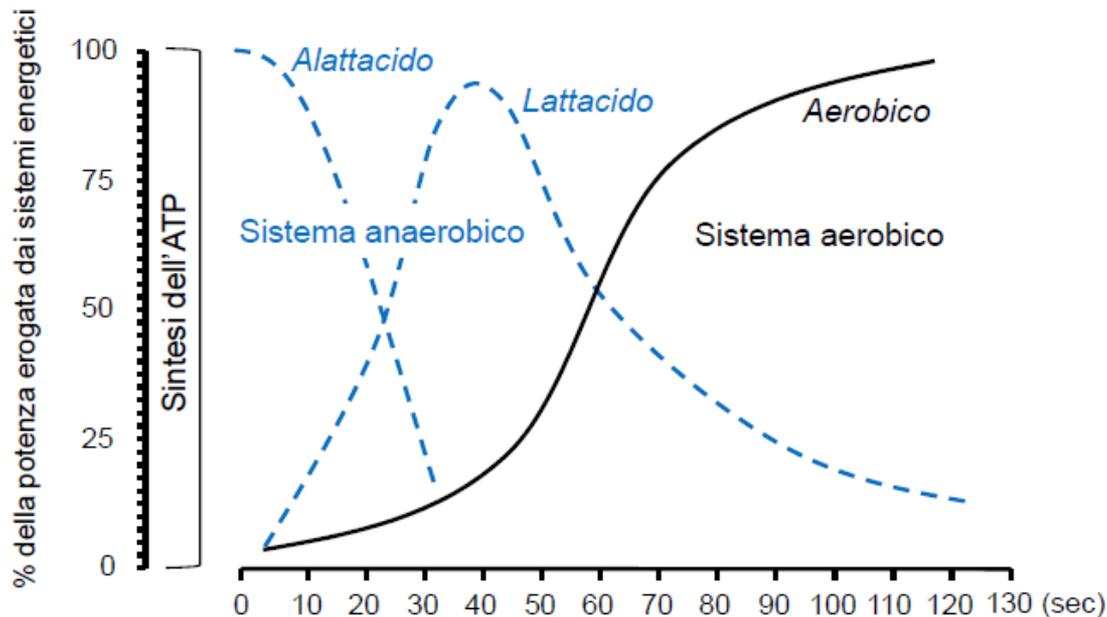
All'aumentare della durata e al diminuire dell'intensità aumenta la quantità di grassi che viene ossidata rispetto ai glucidi.

Fonti energetiche per diversi sport

Fonti energetiche	Fonti anaerobiche			Fonti aerobiche						
	Alattacide	Lattacide								
Fonti principali di energia	Produzione di ATP in assenza di O ₂			Produzione di ATP in presenza di O ₂						
Substrato	Sistema ATP-CP	Sistema glicogeno muscolare ed epatico + acido lattico		Glucosio utilizzato in presenza di O ₂			Grassi	Proteine		
Durata esercizio	0s	10s	40s	70s	2min	6min	25min	1ora	2ore	3ore
Sport	100 m	200 m	800 m		Medie distanze corsa, nuoto	Lunghe distanze corsa, nuoto				
	Salti	400 m	100 m nuoto		Pugilato	Sci di fondo				
	Lanci	50 m nuoto	Esercizi di ginnastica al suolo		Arti marziali	Ciclismo su strada				
	Pesistica	Ciclismo su pista	Sci discesa		Nuoto sincronizzato	Triathlon				
	Salto con gli sci	Ginnastica artistica	Ciclismo su pista (inseguimento ...)		Ciclismo					
	Ginnastica (volteggi)									
	Diversi sport di squadra									
Abilità	Acicliche	Acicliche e cicliche				Cicliche				

Specificità metabolica dell'allenamento

Bisogna tenere conto dei principali metabolismi coinvolti nell'attività per sapere come organizzare correttamente l'allenamento (recupero, intensità, durata...)



L'APPARATO MUSCOLARE

I muscoli permettono di **trasformare energia chimica in energia meccanica** → movimento

Solo $\frac{1}{4}$ dell'energia chimica viene trasformata in energia meccanica, il resto è dissipato in calore.

Facendo attività fisica si disperde calore.

Tipi di tessuto muscolare:

- **Liscio:** organi interni, involontario
- **Striato:** muscolo scheletrico, volontario (impulso elettrico conscio)
si inserisce con i tendini sulle ossa
- **Cardiaco**

Caso particolare: **diaframma**

(striato ma involontario sebbene controllabile volontariamente)

I costituenti del muscolo scheletrico

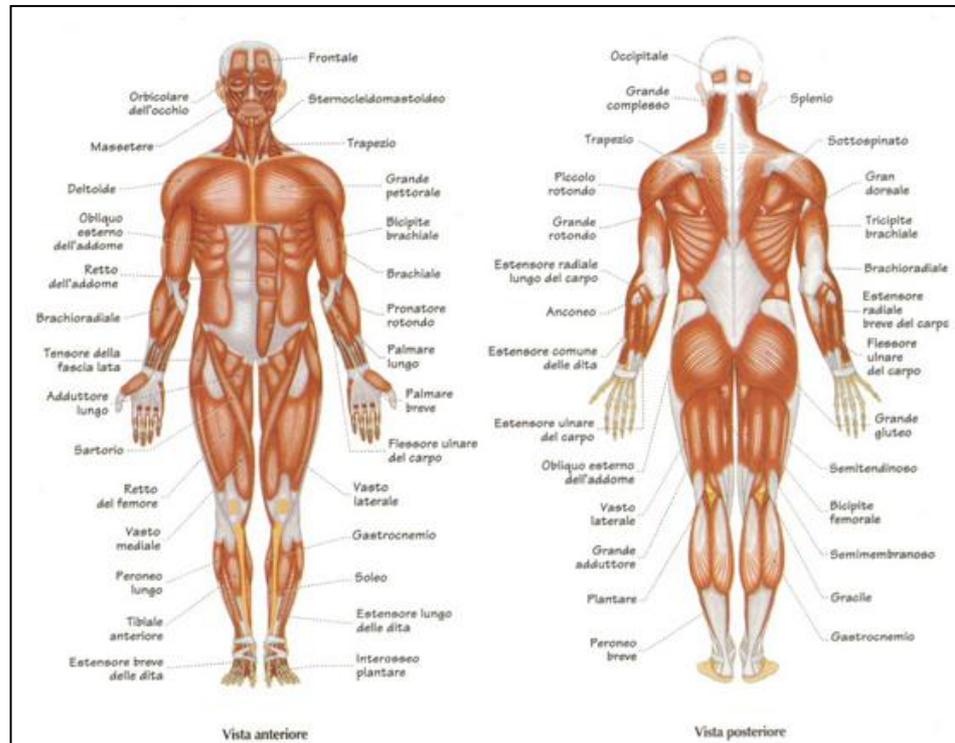
- **Acqua** (circa il 75%)
- **Proteine** (circa il 20%). Le più importanti sono miosina e actina.
- **Glicidi** (0,5-1,5%). Il più importante è il glicogeno
- **Grassi** neutri, colesterolo e fosfolipidi
- **Sali minerali** (circa il 5%)
- **Enzimi**
- Sostanze estrattive azotate (es.: urea) e sostanze estrattive non azotate (es.: acido lattico)

Il muscolo scheletrico

Quanti sono? Circa **600**

36-45% del **BW** totale

E' il tessuto più rappresentato del corpo umano.



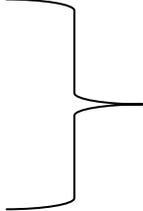
La maggior parte dei **muscoli** degli **arti** e del **tronco** lavorano come **coppie in opposizione**:

- **Agonisti**
- **Antagonisti** – azione opposta all'agonista

Es. bicipite e tricipite brachiale



Le proprietà del muscolo:

- **Elasticità**
 - **Estensibilità**
 - **Contrattilità** → capacità di produrre **tensione** e di accorciarsi
- 
- Permettono al muscolo di riprendere la forma di riposo dopo essere stato allungato

- La maggior parte dei muscoli si **può accorciarsi** fino a quasi **metà della lunghezza di riposo**.

- Possono **allungarsi fino al 150% della lunghezza di riposo**

Legge di Borelli e Weber Fick:

La lunghezza del muscolo è proporzionale alla sua capacità di accorciarsi e questa è circa uguale alla sua metà

Legge di Starling:

La forza contrattile di un muscolo è direttamente proporzionale alla lunghezza delle fibre a inizio contrazione

Legge di Shwann:

La forza assoluta del muscolo diminuisce man mano che esso si accorcia

Il muscolo si comporta come un elastico.

I muscoli scheletrici sono attaccati alle ossa
tramite due estremità tendine:

ORIGINE - minor movimento

INSERZIONE - maggior movimento

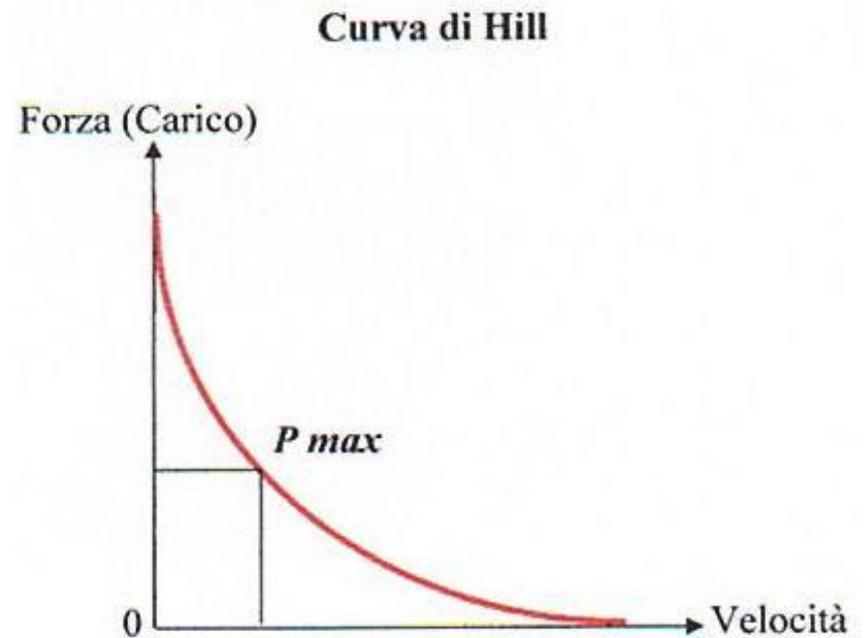
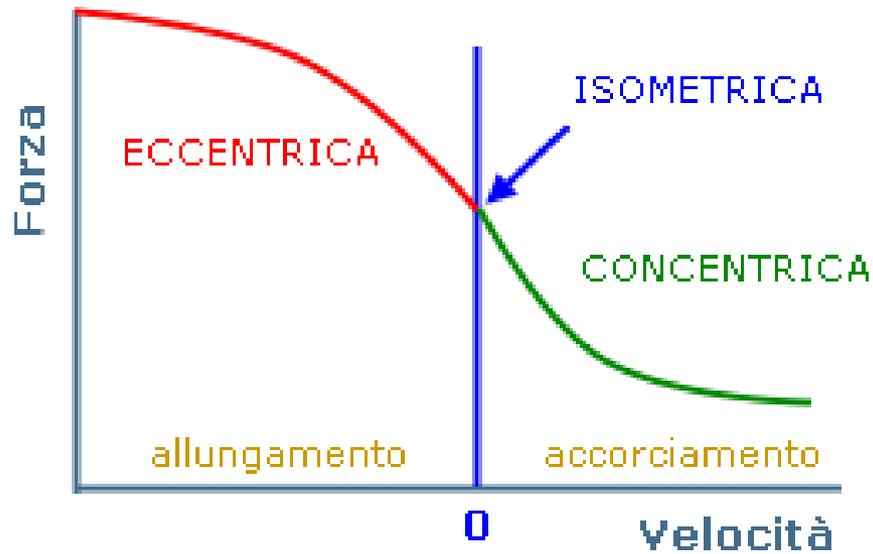
Tra origine e inserzione c'è il **ventre muscolare:**
fibre muscolari + tessuto connettivo + reticolo
vascolare

Tipi d'azione muscolare

- **Concentrica**: il muscolo contraendosi si accorcia, tensione prodotta maggiore del carico esterno
- **Eccentrica**: il muscolo contraendosi si allunga, tensione prodotta minore del carico esterno
- **Isometrica**: il muscolo contraendosi non cambia lunghezza, tensione prodotta uguale al carico esterno, assenza movimento articolare (muscoli posturali)

altre: **pliometrica**, auxotonica, isotonica,
isocinetica(v costante)

Il grafico di Hill



Struttura macro e microscopica del muscolo



La **fibra muscolare** è la **cellula muscolare**, l'elemento strutturale del muscolo scheletrico.

E cilindrica e **polinucleata**.

La **lunghezza** delle fibre va **da pochi millimetri** (muscoli oculari) **a 30 cm** (sartorio).

Ogni fibra muscolare è avvolta e separata dalle altre da uno strato di tessuto **connettivo**, l'**endomisio**.

Le fibre si raggruppano in **fascicoli (fino a 150)**.

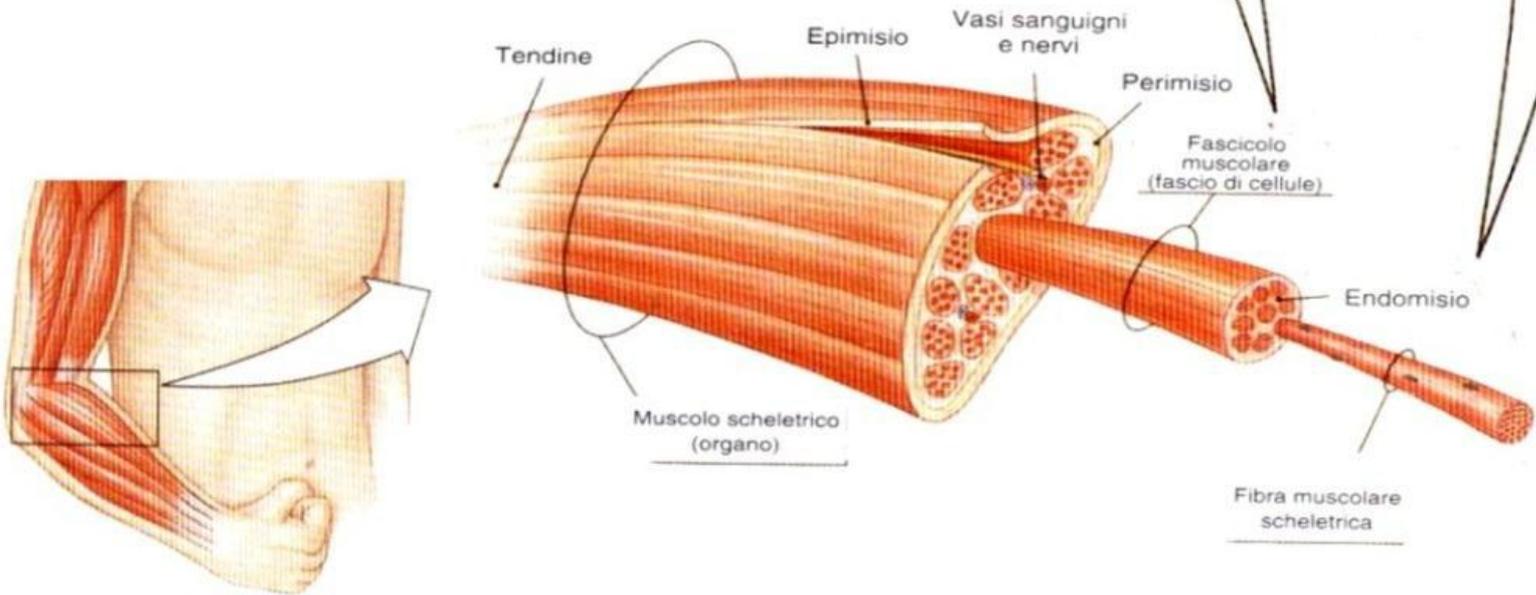
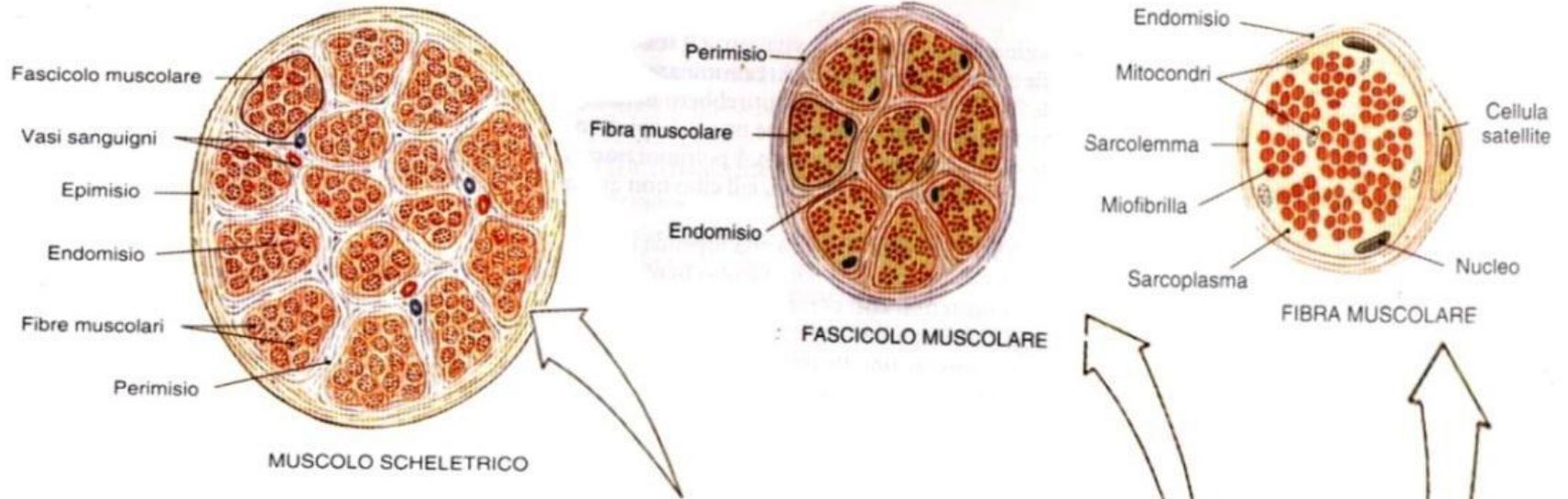
Ogni **fascicolo** è **circondato** da connettivo: il **perimisio**

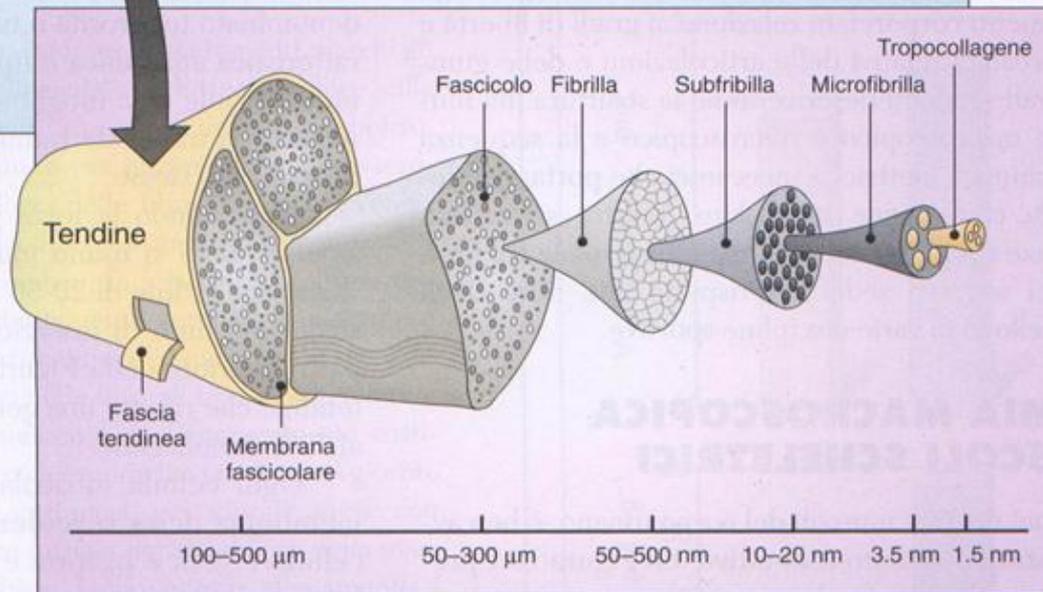
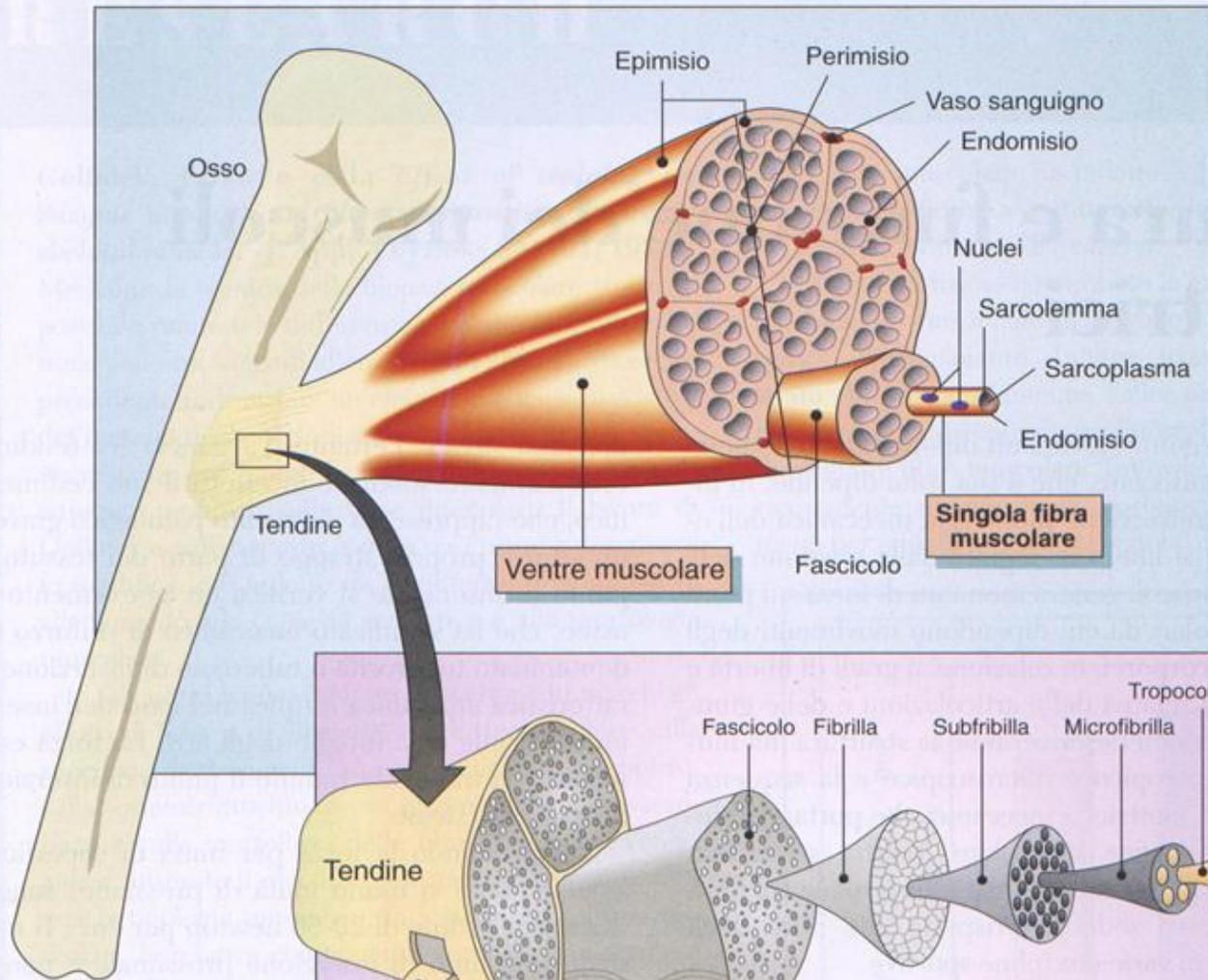
Ogni muscolo è costituito da più fascicoli.

Il **muscolo** è avvolto da una fascia esterna di connettivo, l'**epimisio**.

L'**epimisio** si unisce agli altri tessuti intramuscolari per formare il **tendine** (≠legamento).

I tendini si inseriscono sul **periostio**.

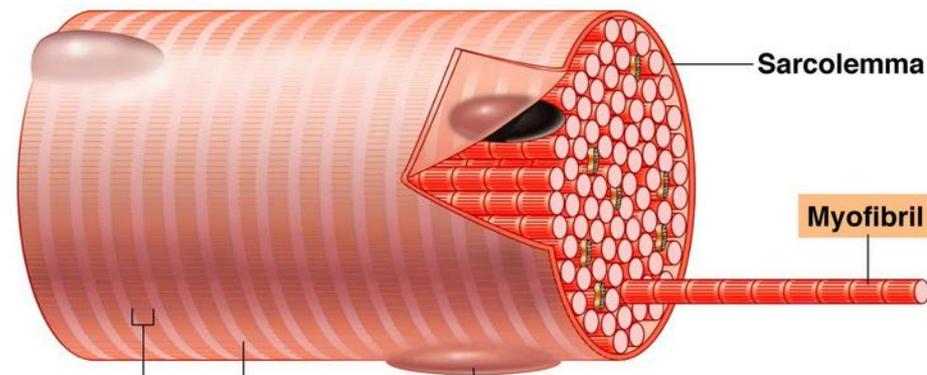




La **membrana plasmatica** della fibra muscolare, sotto all'endomisio, è detta **sarcolemma**.

La sua principale funzione è la trasmissione dell'onda elettrochimica di depolarizzazione lungo la superficie della fibra.

Tra la **membrana basale** e il **sarcolemma** sono presenti le **cellule satellite**.



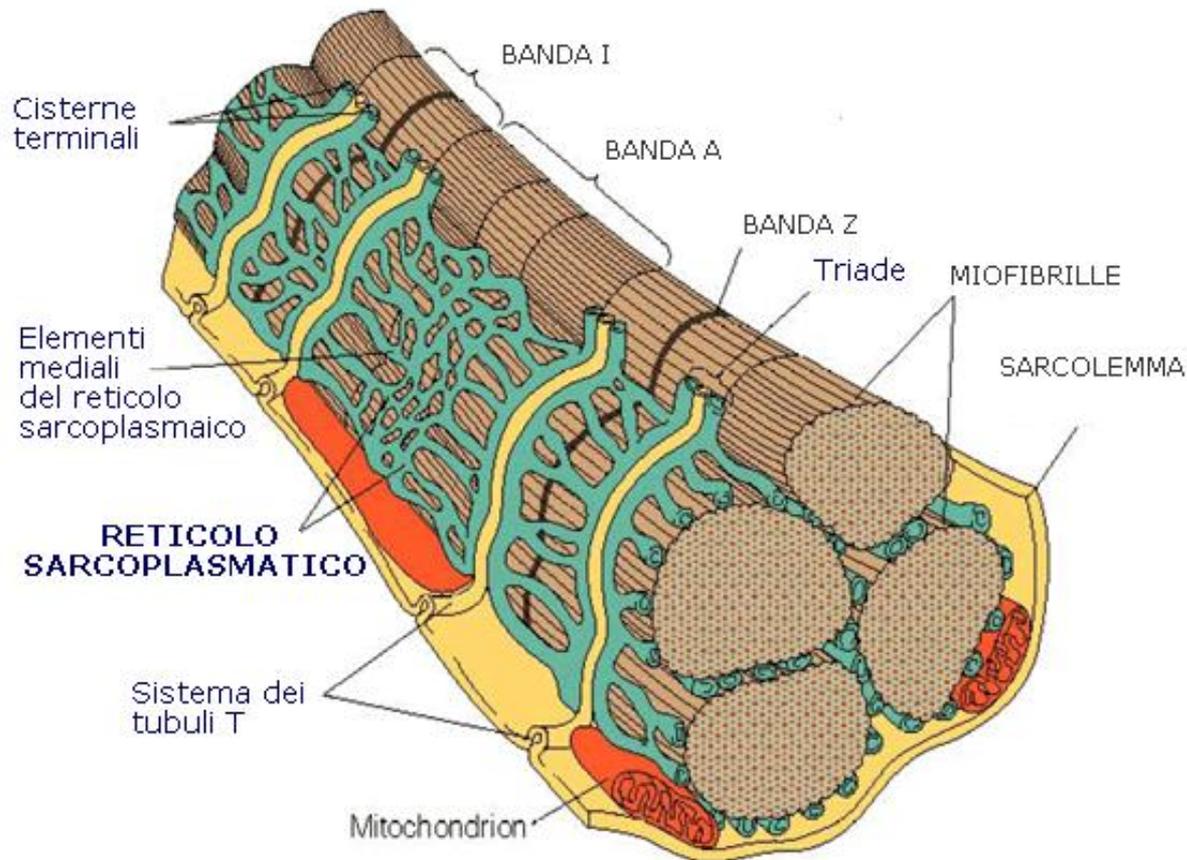
Il **citoplasma** della cellula muscolare è detto **sarcoplasma**, un **fluido gelatinoso** contenente lipidi, enzimi, nuclei, mitocondri e vari organelli cellulari.

A differenza del citoplasma delle altre cellule contiene grandi quantità di:

- **glicogeno**
- **mioglobina**
- **tubuli trasversi** o **tubuli t**, prolungamenti del sarcoplasma, interconnessi, che attraversano la cellula per trasmettere l'**impulso nervoso** e alcune sostanze (ioni, glucosio, ossigeno).

E' presente anche un sistema di tubuli longitudinali: il reticolo sarcoplasmatico

Contiene ioni calcio (Ca^{++})



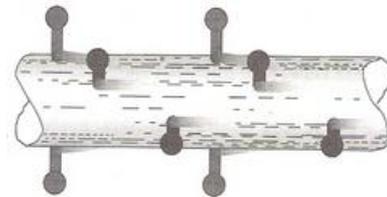
Struttura submicroscopica del muscolo scheletrico

All'interno della **fibra** muscolare sono disposte parallele tra loro **migliaia di miofibrille** (la struttura che permette la contrazione)

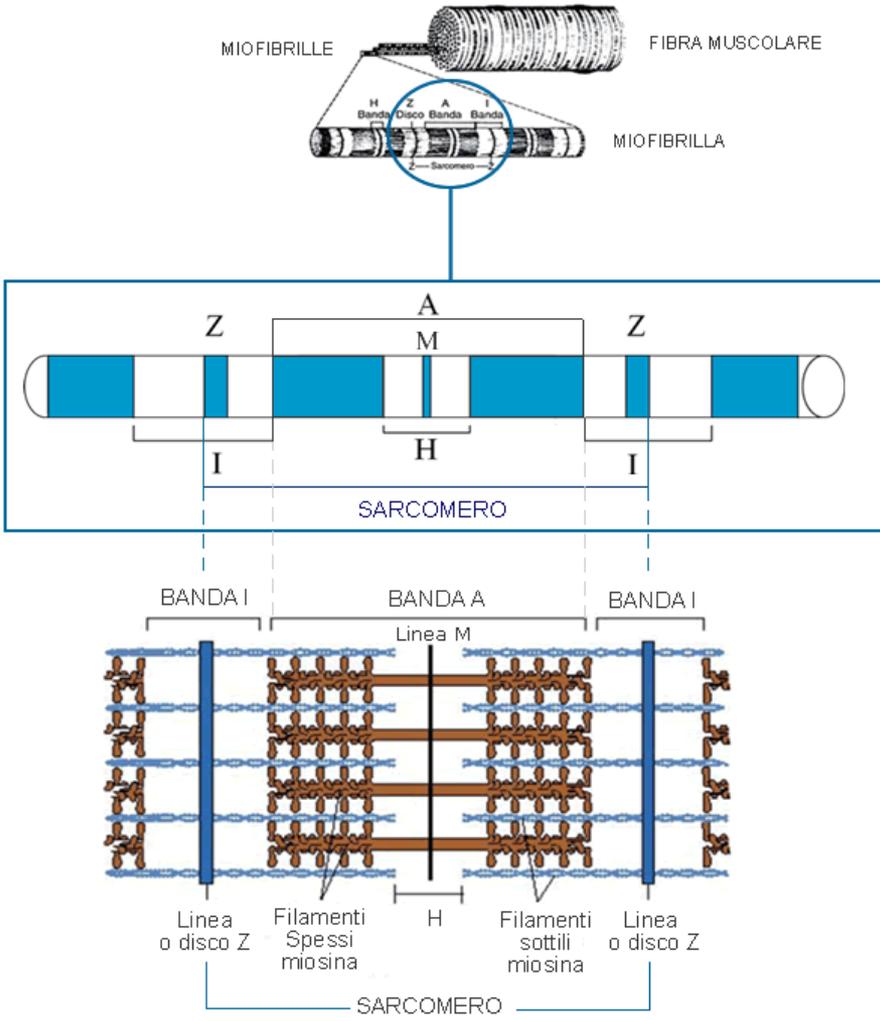
Le miofibrille sono formate da diverse proteine, le principali sono la **miosina** e l'**actina**, che costituiscono i **miofilamenti**.

Ci sono **due tipologie di filamenti**:

- **sottili** → **actina** (2 filamenti avvolti a doppia elica) + 2 proteine regolatrici: **tropomiosina** e **troponina**
- **spessi** → **miosina**



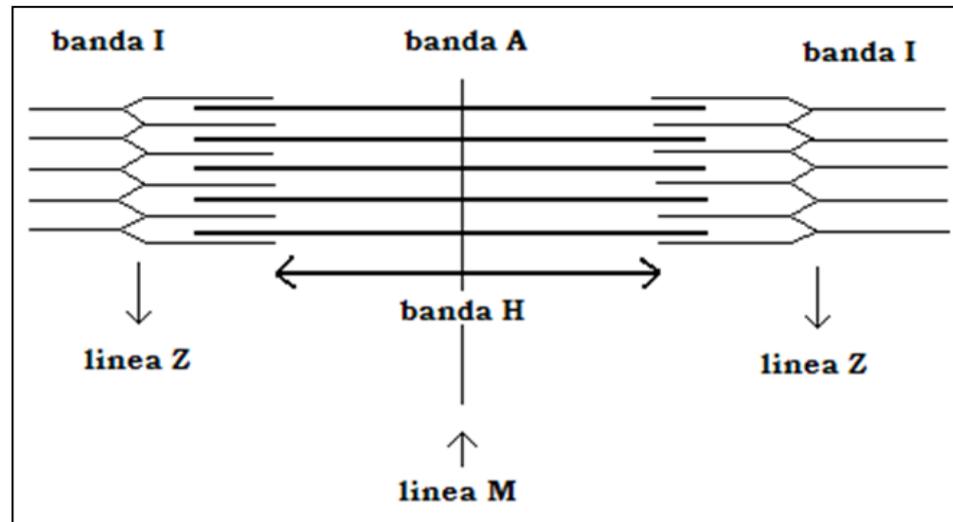
Il muscolo scheletrico è detto striato perché **al microscopio** presenta **striature chiare e scure** dovute rispettivamente alla diversa **struttura dei miofilamenti**



La zona più scura è detta **banda A** mentre quella più chiara **banda I**

L'**actina** si inserisce nella **linea Z** che divide in due la banda I.

La parte di miofibrilla delimitata da due linee z è detta **sarcomero**, la **minima unità funzionale** (contrattile) **del muscolo**.

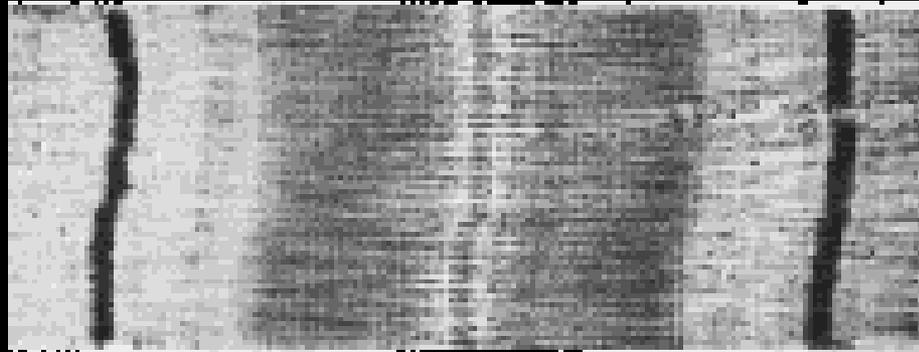


Ciascuna miofibrilla è formata da moltissimi sarcomeri.

Le **bande I** sono formate unicamente da filamenti di **actina**,
mentre le **bande A** sono formate dalla sovrapposizione di filamenti
spessi (**miosina**) e sottili (**actina**),
ma la parte centrale della banda A che è formata solo da **miosina** e
prende il nome di **zona H**.

In **mezzo alla zona H** c'è una linea più scura, detta **linea M**, che è posta
al centro del sarcomero, è formata da proteine che uniscono filamenti
adiacenti di miosina.

Sarcomere



Z line

Z line

Thin filaments

Thick filaments

I band

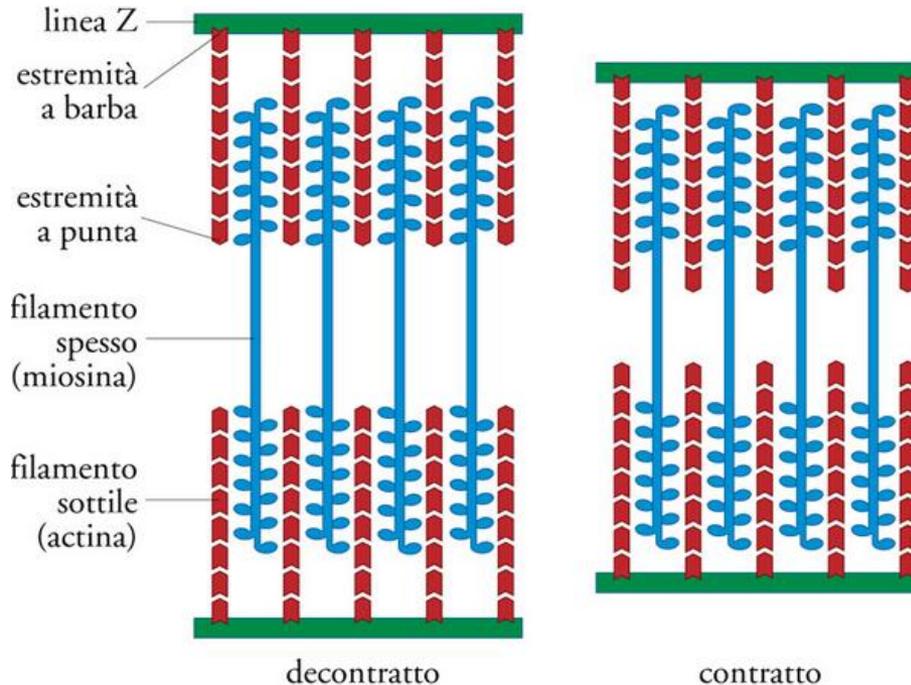
A band

I band



La teoria dello scorrimento di Huxley

Durante la contrazione i sarcomeri si accorciano: reciproco scorrimento dei filamenti di miosina su quelli di actina



La banda I si accorcia mentre la banda A si ingrandisce

Fisiologia della contrazione

La contrazione avviene in seguito ad un impulso nervoso.

L'**impulso nervoso** su comando della corteccia cerebrale viene prodotto dal **motoneurone alfa** presente nel **midollo spinale**.

L'impulso viaggia lungo il nervo fino alla **placca neuromuscolare** (la struttura di connessione tra SN e muscolo)

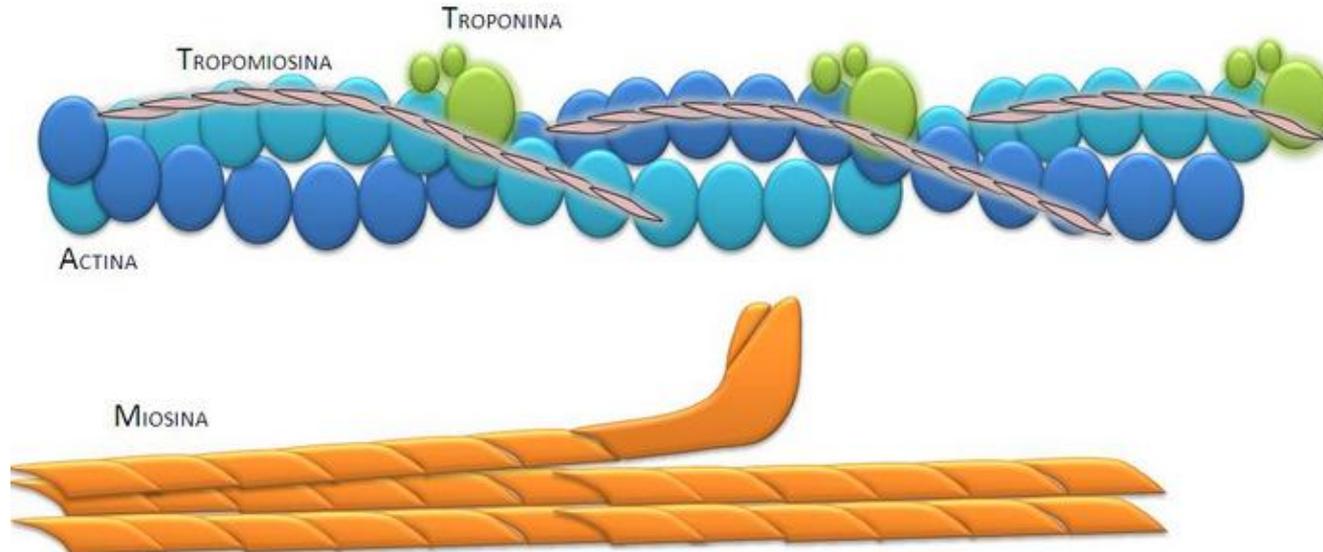
Quando l'impulso elettrico giunge alla placca motrice, la **membrana presinaptica libera acetilcolina** che determina la **depolarizzazione** locale del **sarcolemma** che si propaga molto velocemente lungo la fibra muscolare.

L'acetilcolina **determina la liberazione dello ione calcio** dal reticolo sarcoplasmatico all'interno della fibra grazie ai tubuli t.

La **contrazione** avviene grazie all'interazione tra la **miosina** e l'**actina**.

L'**actina**, presenta **specifici siti d'interazione** per la **miosina** che in condizioni di riposo sono occupati dalla **tropomiosina**.

A contatto con la tropomiosina vi è un'altra **proteina regolatrice**, la **troponina** (tre subunità TIC)



Il calcio legandosi alla troponina ne causa un cambiamento di conformazione, che a sua volta causa un cambiamento di conformazione della **tropomiosina** che libera il sito d'interazione dell'actina per la miosina.

Al termine della contrazione il calcio viene riportato nel reticolo sarcoplasmatico grazie ad una pompa detta SERca^{++} , che consuma ATP. Per il rilassamento del muscolo viene utilizzato dal 30 al 40% dell'ATP prodotto!!!

Una volta liberati i siti può avvenire l'interazione tra i miofilamenti spessi e sottili.

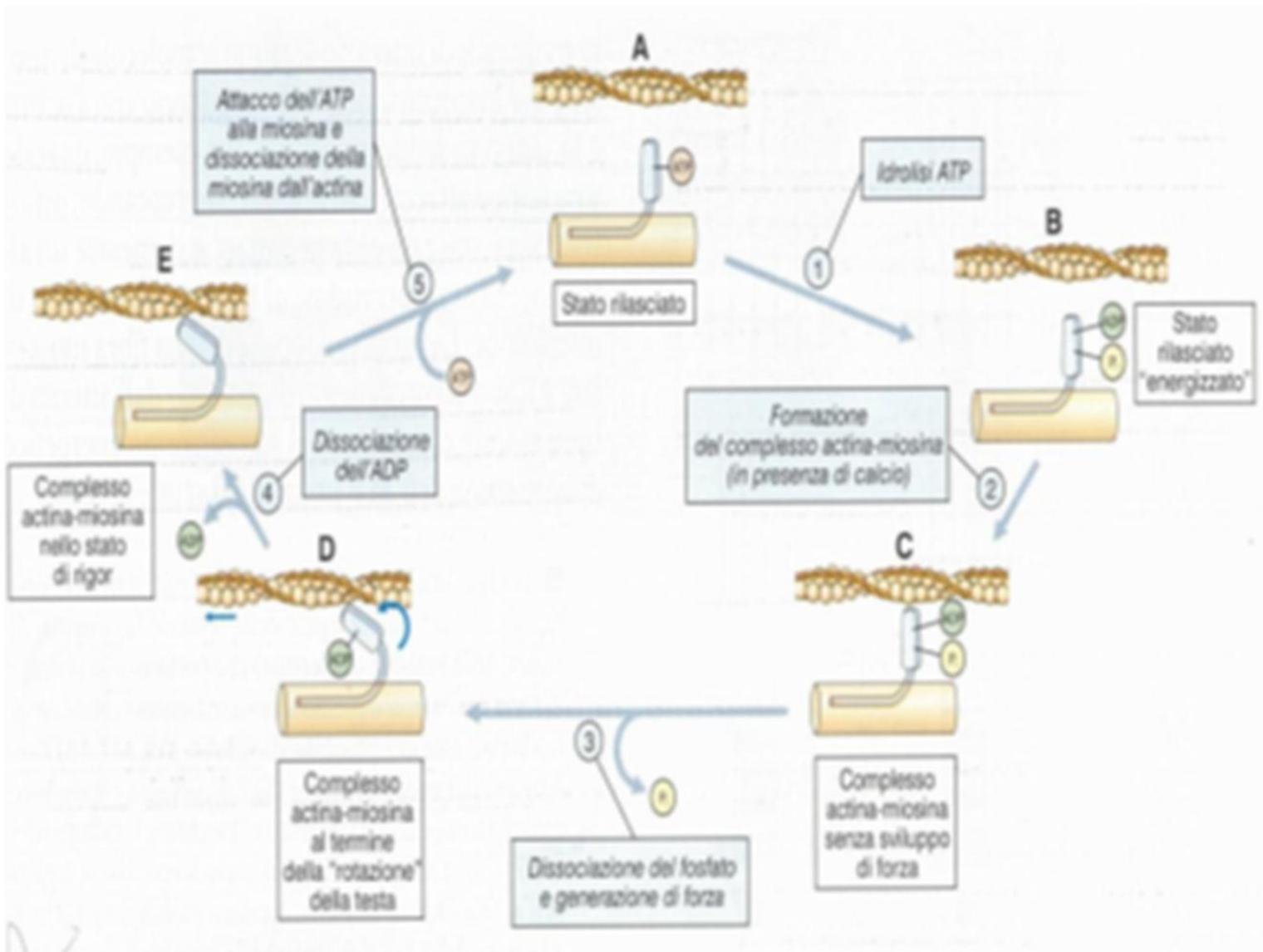
La **miosina** presenta la **forma di una mazza da golf**.



Le **teste di miosina** sporgono dal miofilamento sottile e presenta **2 siti d'interazione**:

- per l'**ATP**
- per l'**actina**

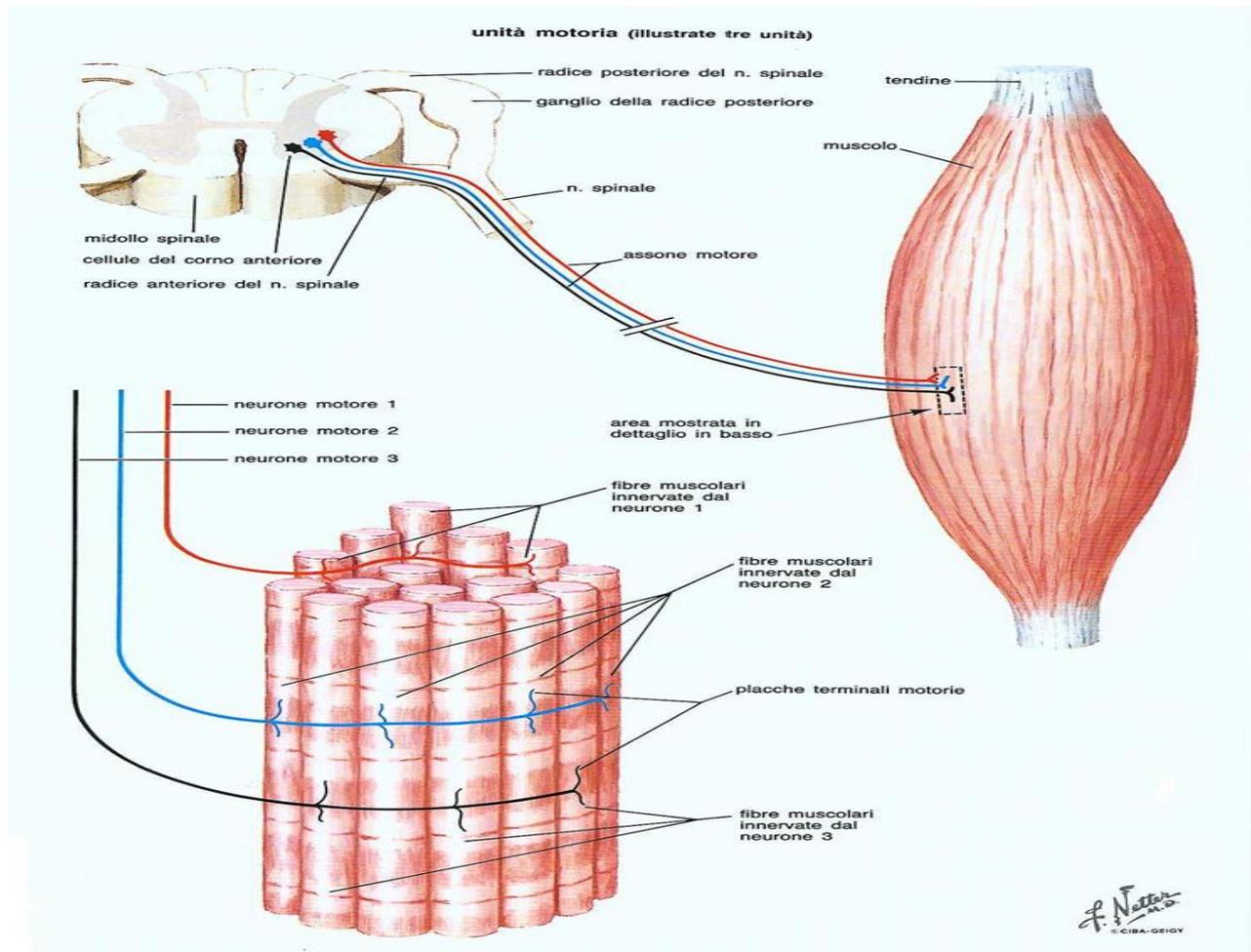
Il ciclo della contrazione muscolare



- 1) A riposo alla testa di miosina è legata una molecola di ATP.
- 2) Quando si liberano i siti d'interazione l'ATP viene idrolizzato in ADP + P che rimangono legati alla testa.
- 3) La testa cambia conformazione andando ad interagire con l'actina.
- 4) Il P lascia la testa di miosina che cambia ulteriormente conformazione generando forza (colpo di potenza)
- 5) Anche l'ADP lascia la testa di miosina (es. rigor mortis)
- 6) Un nuovo ATP si lega alla testa che si stacca dal filamento sottile. Il ciclo riparte

L'UNITA' MOTORIA

è l'insieme del motoneurone + le fibre da esso innervate



Il motoneurone determina le caratteristiche delle fibre muscolari che innerva.

Una fibra muscolare è innervata da un singolo neurone



Legge del tutto o nulla

Il numero di fibre innervate da uno stesso neurone varia da circa una decina (muscoli dell'occhio) a un paio di migliaia.

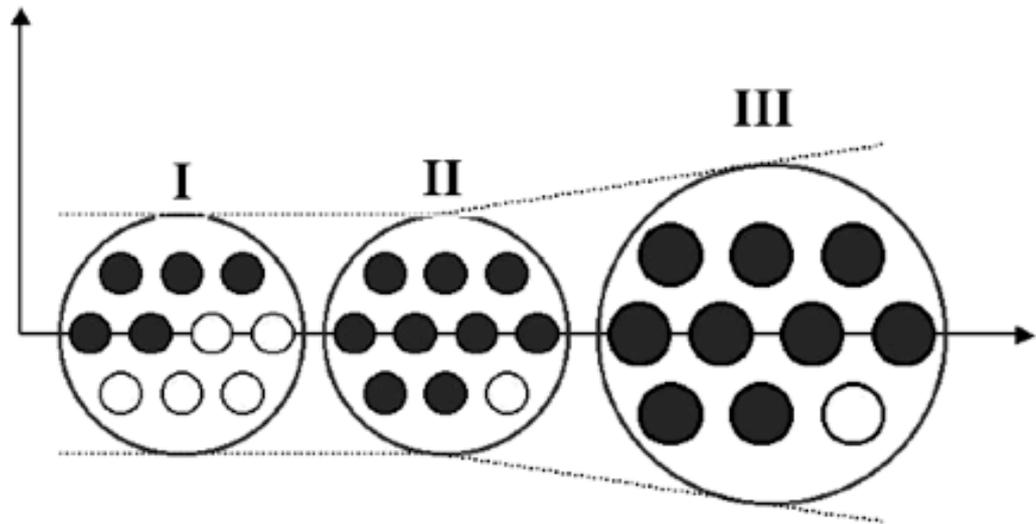
La **grandezza delle unità motorie** è relazione alla **precisione** dei movimenti svolti

La regolazione della forza

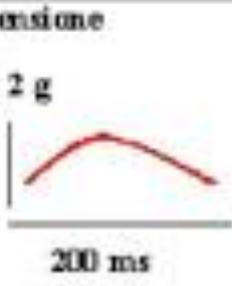
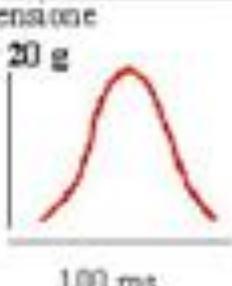
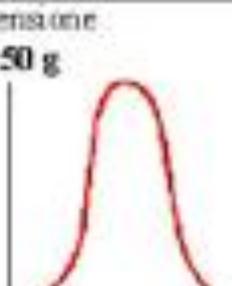
Avviene grazie a:

- Il **reclutamento** delle unità motorie
- La **frequenza di scarica** delle unità motorie reclutate

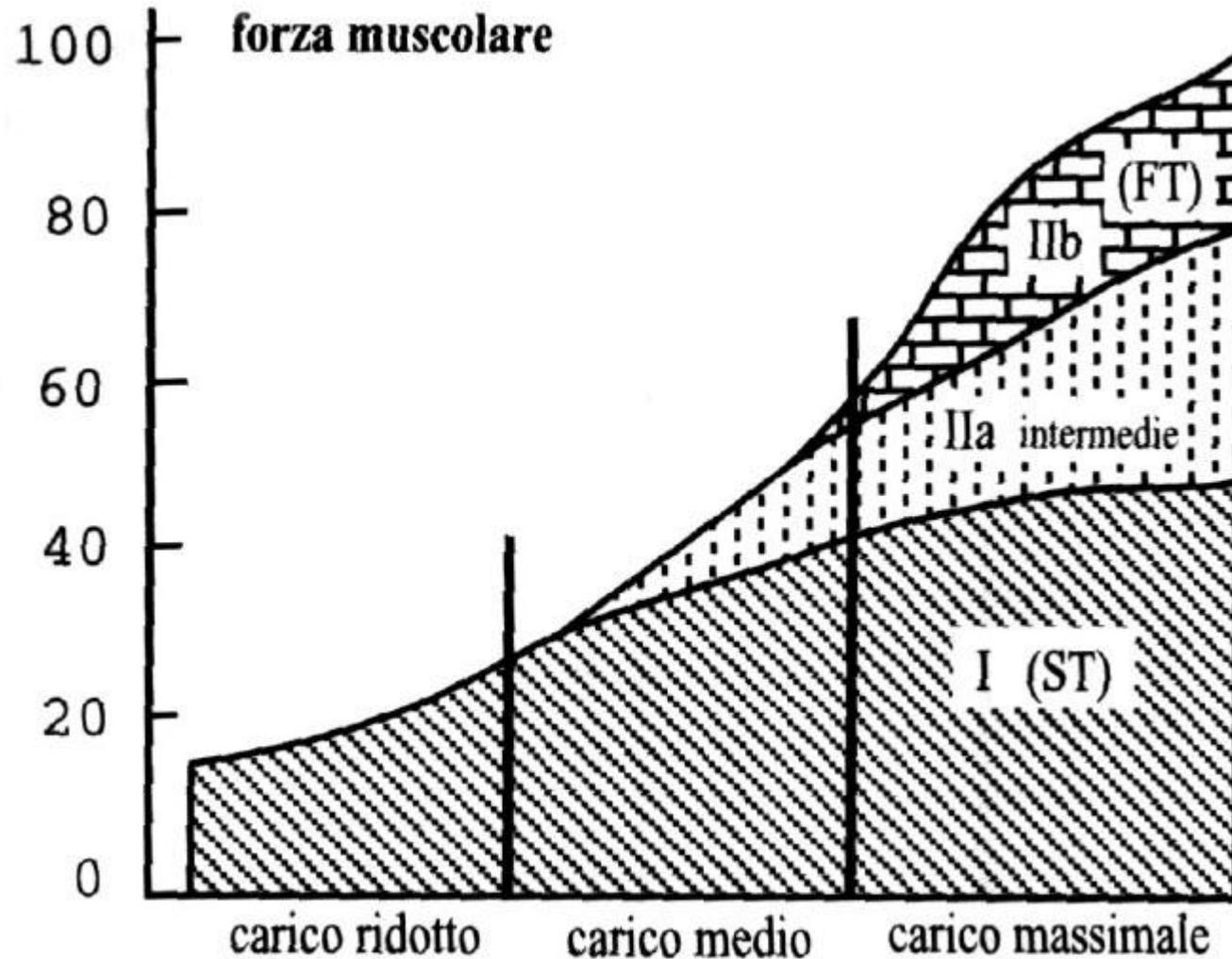
Grafico di Fukunaga



Fenotipi di fibra muscolare

Fibre	Caratteristiche generale	Metabolismo	Scossa muscolare	Vascolarizzazione	Affaticabilità	Substrati	
						Glucidi	lipidi
I	Lente	Aerobico	<p>Tensione</p> <p>2 g</p>  <p>200 ms</p>		Scarsa	☆ ☆ ☆	☆ ☆ ☆
IIa	Rapide	Aerobico anaerobico	<p>Tensione</p> <p>20 g</p>  <p>100 ms</p>		Media	☆ ☆ ☆	☆
IIb	Rapide	Anaerobico	<p>Tensione</p> <p>50 g</p>  <p>100 ms</p>		Elevata	☆ ☆ ☆	☆

Il principio di Henneman





Grazie... dell'attenzione! ;)