

Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico

Introduzione al
metabolismo energetico
nell'esercizio fisico



Organizzazione della lezione

- **Adenosin trifosfato: la moneta energetica**
- **Continuum energetico**
- **Produzione di energia per la contrazione muscolare**
- **Sistemi energetici e velocità di corsa**
- **Perché non si può correre la maratona come una gara di velocità?**
- **Fonti di energia e muscoli**

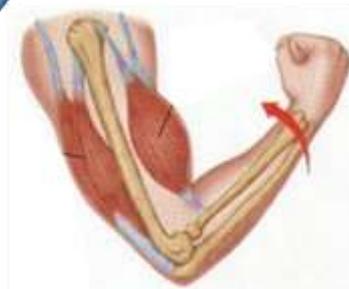
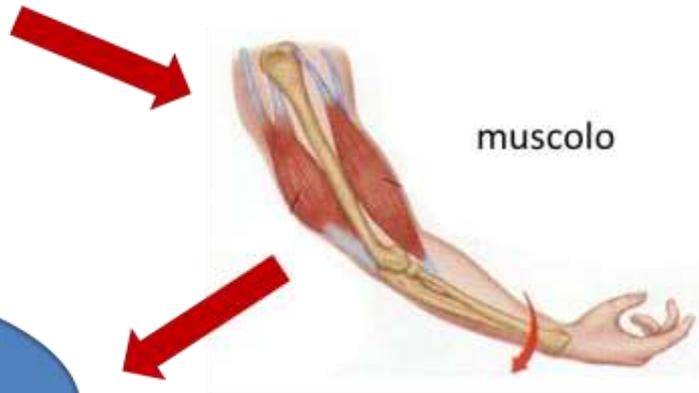


Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico: D. MacLaren, J. Morton
© edi.ermes
Copia data in licenza a Prof. Carlo Mischiati

Il muscolo è un dispositivo che consente di convertire l'energia chimica rilasciata dall'idrolisi dell'**ATP** in lavoro meccanico

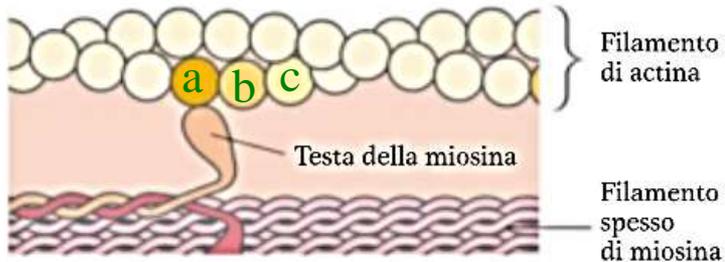
Energia chimica
(intrappolata nelle
molecole energetiche)

Energia meccanica
- per generare
movimento
- per generare forza



0

l'ATP viene consumata dalla miosina durante la contrazione



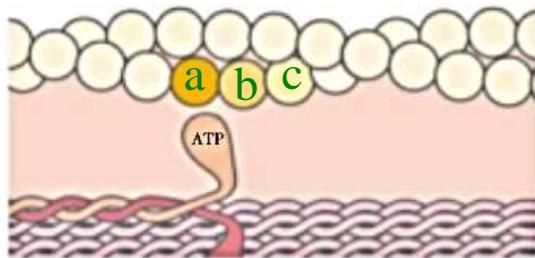
ciclo di contrazione-rilassamento

(quattro fasi)

0. l'arrivo del Ca^{2+} → la **miosina** (*forma ad angolo*) si attacca all'**actina** (a)

1

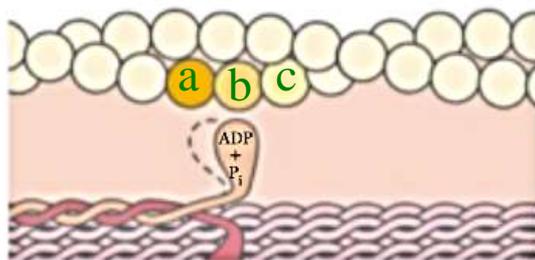
ATP ↓ L'ATP si lega alla testa della miosina e causa la dissociazione dall'actina



1. l'**ATP si lega alla miosina** (solo quando la miosina è legata all'actina può legare ATP) → la miosina si stacca dall'actina;

2

L'ATP saldamente legato è idrolizzato, e avviene una modificazione conformazionale. ADP e P_i restano legati alla testa della miosina



2. l'**enzima miosina-ATPasi** idrolizza l'ATP legato alla miosina (in ADP e fosfato inorganico che rimangono legati alla testa di miosina impedendo il ritorno alla forma ad angolo) → la miosina si proietta in avanti (*forma distesa*)

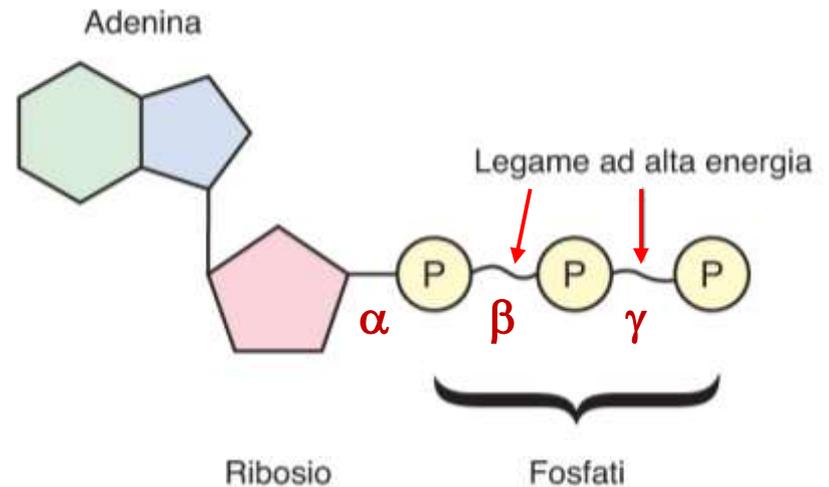
3

P_i ↓ La testa della miosina si attacca al filamento di actina e il P_i è rilasciato

3. la **miosina si attacca sull'actina** (b) ...

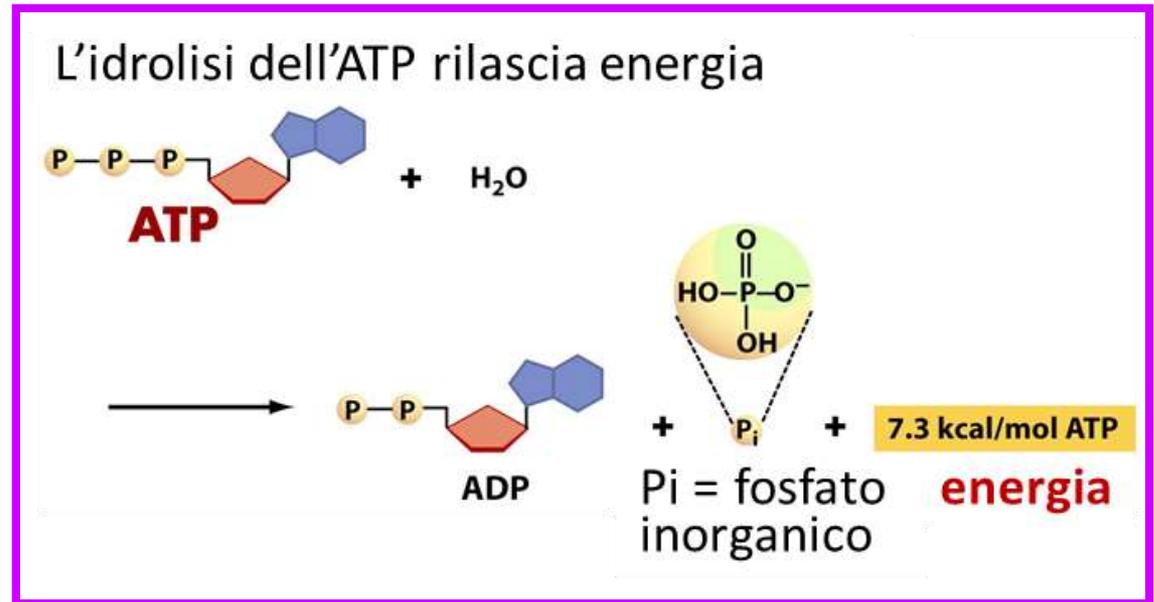
Adenosin trifosfato: la moneta energetica

- La **struttura** di una molecola di ATP è formata da una base (**adenina**) legata a una molecola di zucchero (**ribosio**) che, a sua volta, è legato a **tre molecole di fosfato**.



Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico: D. MacLaren, J. Morton
© *edi.ermes*
Copia data in licenza a Prof. Carlo Mischiati

ATP: la moneta energetica



- La **rottura del legame tra gli ultimi due gruppi fosfato** (legame γ) stacca un gruppo fosfato e **fornisce energia**
- Questa **reazione è reversibile** (avviene anche nel senso inverso), cioè l'ATP può essere sintetizzato a partire dall'ADP, ma **SOLO nel caso in cui nella cellula abbia energia sufficiente per creare un nuovo legame anidridico.**
- **L'energia necessaria viene fornita** consumando la **creatina fosfato**, oppure mediante la **glicolisi anaerobica** o il **metabolismo ossidativo**.

Adenosin trifosfato: la moneta energetica

- La quantità di ATP nella fibra muscolare: **25 millimoli/kg di muscolo** disidratato, ovvero **40-50 g in totale nel muscolo scheletrico** del corpo umano.
- In una **attività muscolare molto intensa l'ATP permettere di correre al massimo per 2-4 sec.**
- Se **ci fosse abbastanza ATP potremmo correre sempre alla velocità massima assoluta**
- Invece, poiché la **quantità di ATP nei muscoli è piuttosto limitata**, abbiamo bisogno di **ricaricare l'ATP** in modo continuativo **durante l'esercizio fisico.**

La contrazione muscolare richiede 4 attività funzionali coordinate e compartimentalizzate:

- 1) Eccitazione della membrana (**fase velocissima**)
- 2) Accoppiamento eccitazione/contrazione (**fase velocissima**)
- 3) Contrazione (dipende dal tipo di MHC, comunque **fase veloce**)
- 4) **Ripristino delle molecole energetiche** (← **velocità limitante**)

La fase più lenta rallenta tutto il processo di contrazione
(**ricarica ATP rapida** → **atleta + veloce** e viceversa)

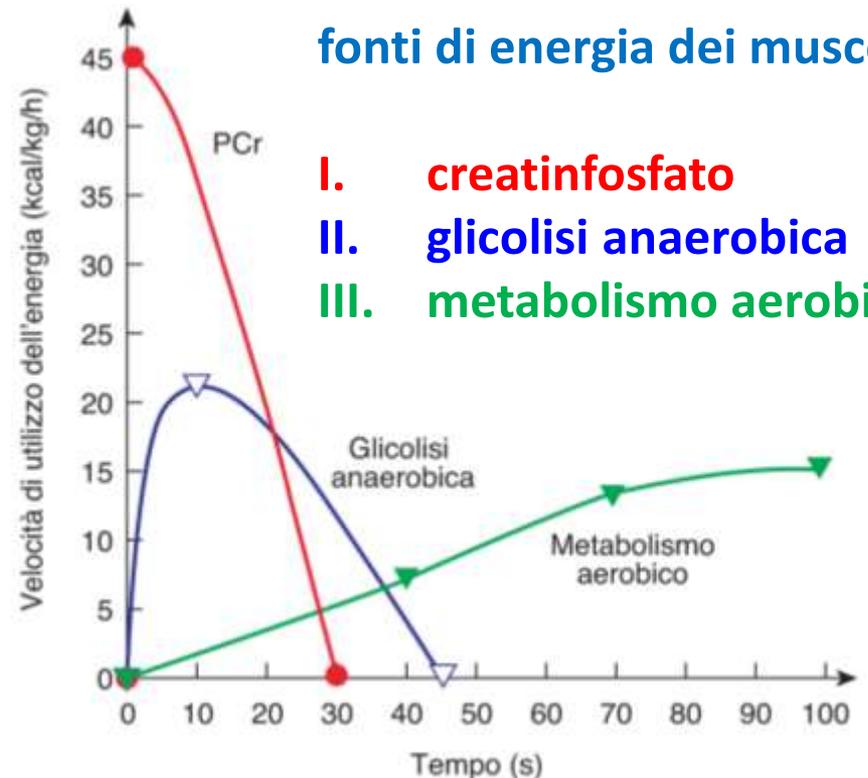
Ovviamente ...

- I **tempi di ripristino dell'ATP** debbono essere rapidi per fornire l'energia necessaria alle esigenze muscolari:
 - dovranno essere molto rapidi per esercizi come la corsa veloce (come i 100m piani);
 - potranno essere un più lenti nell'attività di resistenza (come una maratona).



Dipende dal tipo di carburante disponibile e dalle condizioni di utilizzo... in un *continuum energetico*

- la **creatina fosfato (PCr)** viene consumata entro i primi secondi di attività muscolare (**1-10 sec**)
- la **glicolisi anerobica** entra in gioco successivamente (**10-60 sec**)
- Il **metabolismo aerobico** (ove possibile) si attiva dopo i primi 60 sec di esercizio.



fonti di energia dei muscoli:

I. **creatinfosfato**

II. **glicolisi anaerobica**

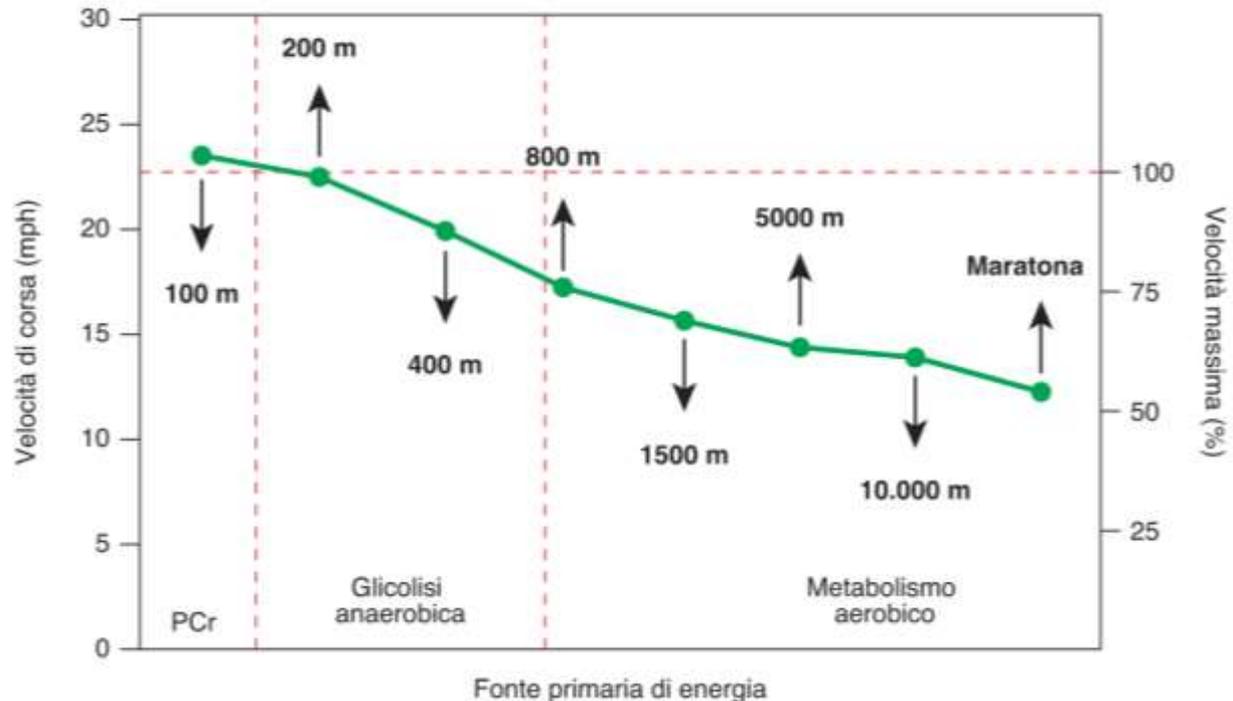
III. **metabolismo aerobico**

Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico: D. MacLaren, J. Morton
© edi.ermes
Copia data in licenza a Prof. Carlo Mischiati

Impiego delle fonti di energia nelle differenti tipologie di attività fisica

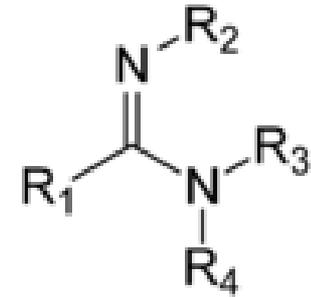
La **fonte di energia** utilizzata **dipende** dalla durata e dall'intensità dell'**esercizio muscolare** svolto

- nelle **corse brevi** (<10 sec, **100m**) che richiedono grande consumo energetico predomina il consumo di **creatina fosfato (PCr)**
- nella **corsa** sulla distanza di **200-400m** prevale la **glicolisi anaerobica**
- nella **corsa** sulle distanze più lunghe (**>800m**) predomina il **metabolismo aerobico**



Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico: D. MacLaren, J. Morton
© edi.ermes
Copia data in licenza a Prof. Carlo Mischiati

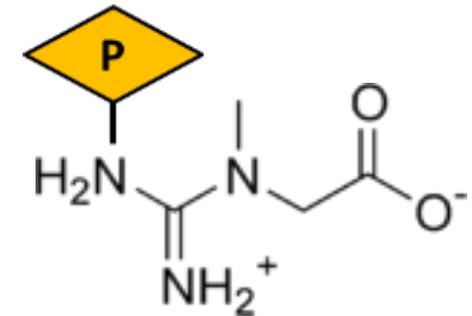
Chimicamente ... la **creatina** è una **ammidina** (un acido carbossilico contenente azoto)



ammidina

È presente in tutto il corpo, ma il **95%** si concentra nel **muscolo scheletrico**.

È **prodotta da fegato** e **pancreas** (circa un grammo al giorno) a partire dagli amminoacidi **arginina** e **glicina**....



creatina

(acido metilguanidinoacetico)

....oppure viene **introdotta con gli alimenti** (**pesce** e **carni rosse** che ne sono particolarmente ricchi).

La **creatina** viene convertita in **creatina fosfato** a seguito dell'unione con un **gruppo fosfato**.

La **creatina fosfato** ha un ruolo importante per i tessuti che necessitano di energia in modo rapido ma temporaneo: oltre ai **muscoli**, anche il **cervello**.

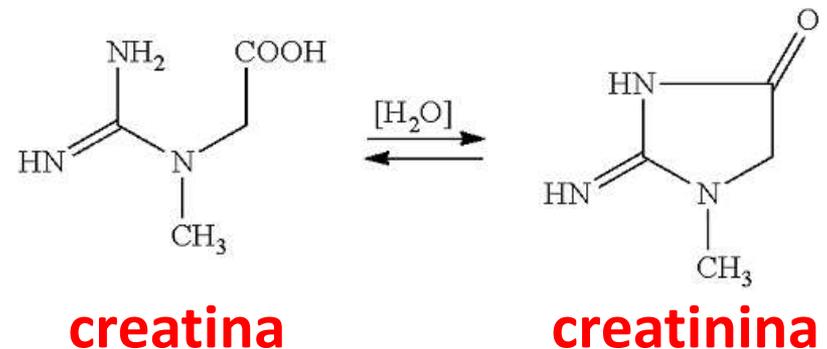
Costituisce uno degli integratori alimentari più utilizzati e di successo degli ultimi decenni → utilizzato **per migliorare la forza** muscolare e le prestazioni atletiche in sport di breve durata (percorsi brevi) che richiedono un elevato sforzo fisico come la **corsa**, il **nuoto** e il **ciclismo su pista**.

La creatina è Doping? è Vietata?

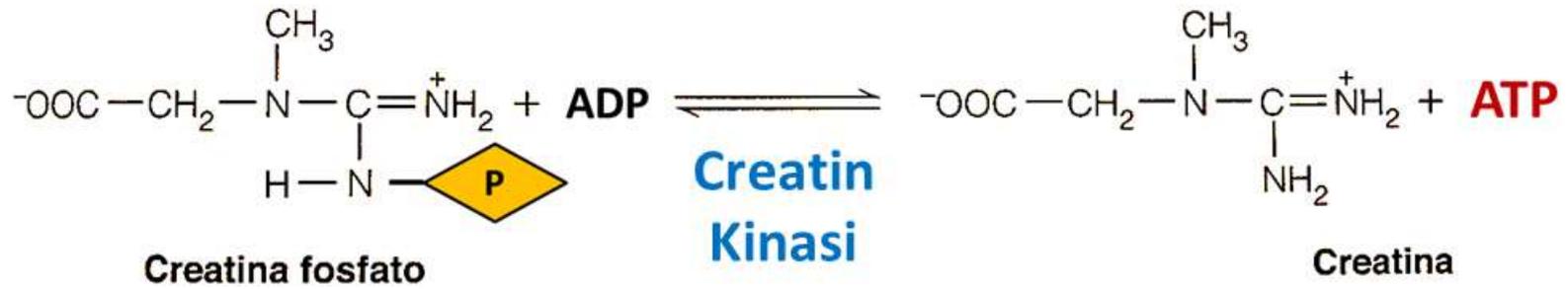
c'è ancora molta confusione in merito, tuttavia il suo uso **non viene considerato doping** e pertanto non è vietato

il CIO e la WADA lo considerano **un integratore alimentare.**

Il suo **prodotto di degradazione (creatinina)** viene ricercato nelle urine e nel sangue come **indice della funzionalità renale.**



Creatina fosfato → è la principale fonte energetica del muscolo durante le **contrazioni intense e di breve durata** (p.e. nelle corse brevi fino a 100 m)



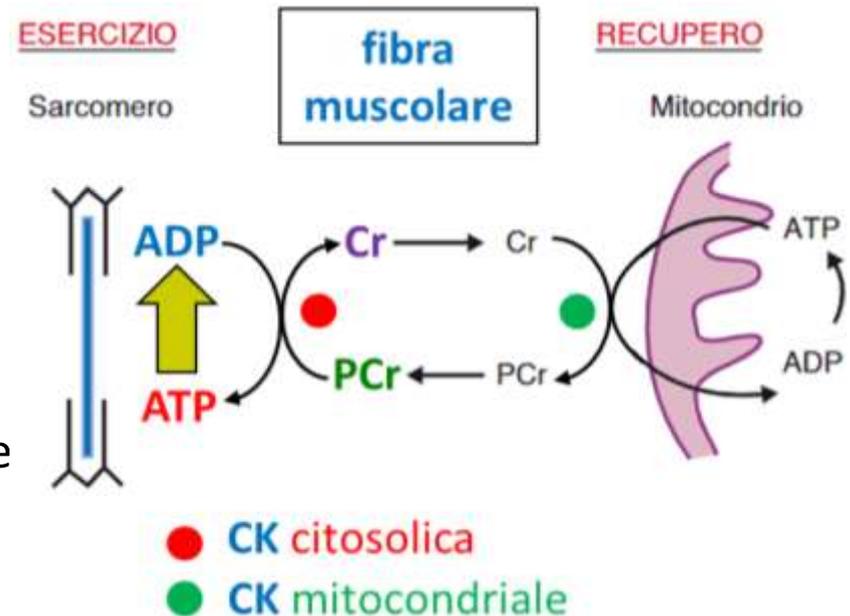
reazione molto rapida

massima velocità nella ricarica dell'ATP

- **Serbatoio di breve durata** → la **quantità** di PCr nelle fibre muscolari è piuttosto limitata: 120 g in totale in un individuo di 70 Kg.
- questa modalità di produzione di ATP è chiamata **anaerobica lattacida** perché non è necessario l'ossigeno e non si produce acido lattico
- è fondamentale negli sport che richiedono **energia massimale in tempi brevi** (**corsa veloce, sollevamento pesi, sprint** dove lo sforzo si esaurisce in **1 e 10s**)

PCr può essere rigenerata durante il recupero aerobico post-esercizio

- Il **PCr** viene consumato nel citosol → l'enzima **CK citosolica** lo usa per rigenerare l'**ATP** (**PCr** → **Cr**)
 - Il **Cr** viene riconvertito in **PCr** grazie alla **CK mitocondriale** (**Cr** → **PCr**) che **preleva un gruppo fosfato dall'ATP mitocondriale**
- La produzione di **ATP mitocondriale** avviene grazie al **metabolismo ossidativo** (che richiede ossigeno per funzionare → aerobico) → è più lento della velocità con cui viene consumata il **PCr** → il **PCr** non viene rigenerato durante l'esercizio intenso e si consuma... (**devo usare un'altra fonte di energia se voglio continuare**)
- durante **l'esercizio intenso** si consuma **PCr**
- durante **il recupero aerobico** si rigenera il **PCr**



Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico: D. MacLaren, J. Morton
© edi.ermes
Copia data in licenza a Prof. Carlo Mischiati

la **resintesi di PCr**
necessita di ossigeno

La resintesi di PCr richiede ossigeno ... dimostrazione

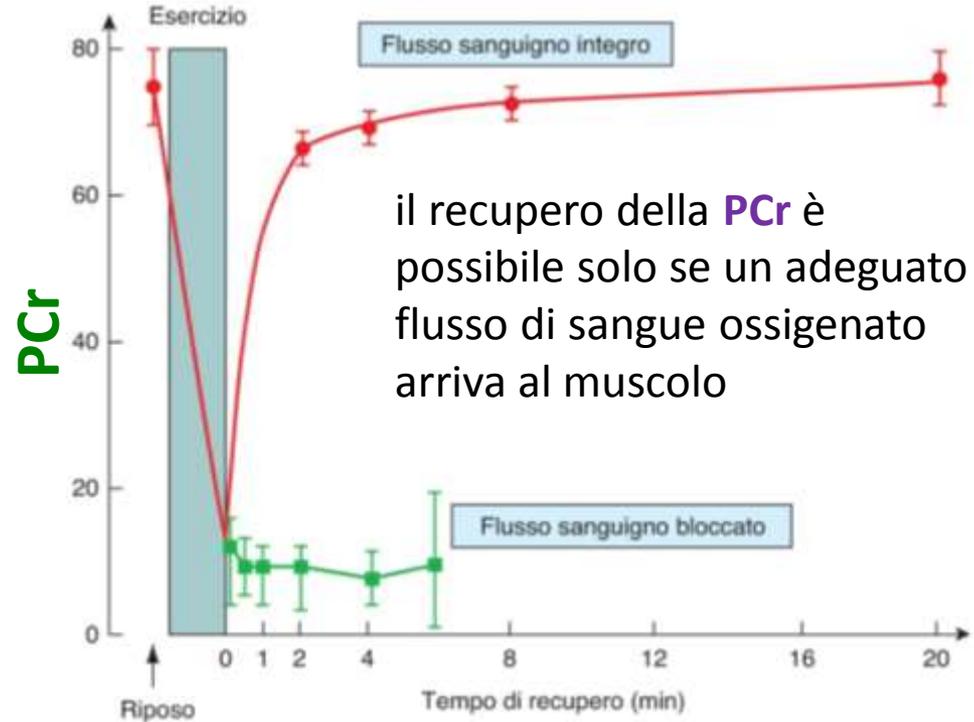
Dal grafico: rapido calo di PCr durante l'esercizio intenso, ma anche rapido recupero,

Se blocco il **flusso di sangue** ai muscoli dopo la contrazione (p.e. laccio emostatico) **la rigenerazione di PCr non è possibile.**

fase di recupero

- **iniziale** → molto rapida → recupero il **75% di PCr nel primo minuto**;
- **tardiva** → più lenta → recupero il restante **25% in altri 3-5 min.**

Consumo → anaerobico
Recupero → aerobico



il recupero della PCr è possibile solo se un adeguato flusso di sangue ossigenato arriva al muscolo

Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico: D. MacLaren, J. Morton
© edi.ermes
Copia data in licenza a Prof. Carlo Mischiati

PREPARAZIONE ATLETICA degli sprinter → necessità di intervallare sforzi intensi con momenti di recupero a basso livello (cosiddetto **recupero attivo**) per ripristinare i livelli di PCr.

Glicolisi anaerobica → contribuisce al bilancio energetico durante la contrazione muscolare intensa per brevi tratti **dai 100 ai 400 m** (durata 10-60 sec)

- Il **glucosio** viene convertito in **glucosio 6-P** ed usato per produrre ATP attraverso le 10 reazioni della glicolisi
- viene conservato nelle fibre muscolari sotto forma di **glicogeno**, in parte arriva col sangue circolante.
- All'inizio dell'attività muscolare il glucosio proviene dalle riserve di glicogeno

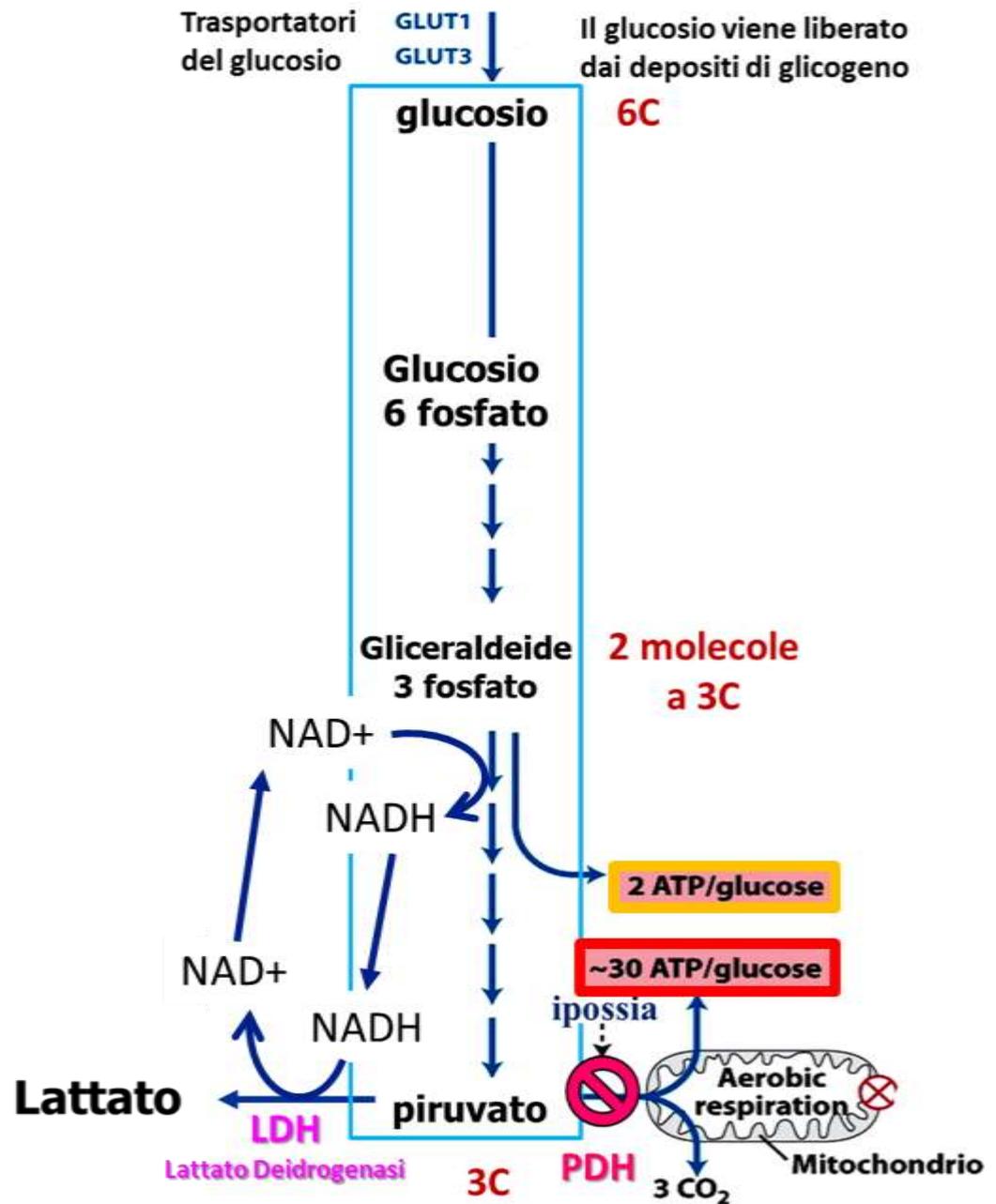
glicolisi

glicogeno → glucosio 1-P → **glucosio 6-P** → piruvato + **ATP**

**In condizioni anaerobiche il piruvato
viene trasformato in LATTATO**

- Le reazioni della glicolisi hanno luogo nel citoplasma, dove **non è richiesta la presenza di ossigeno**, ed è per questo che tale via metabolica è detta anaerobica (**anaerobica lattacida** dal momento che l'acido lattico è il prodotto finale di demolizione del glucosio).
- L'**accumulo di acido lattico** nella fibra muscolare **abbassa il pH** del citoplasma (diventa più acido) rendendo meno efficiente la produzione di energia attraverso questa via (**affaticamento**).

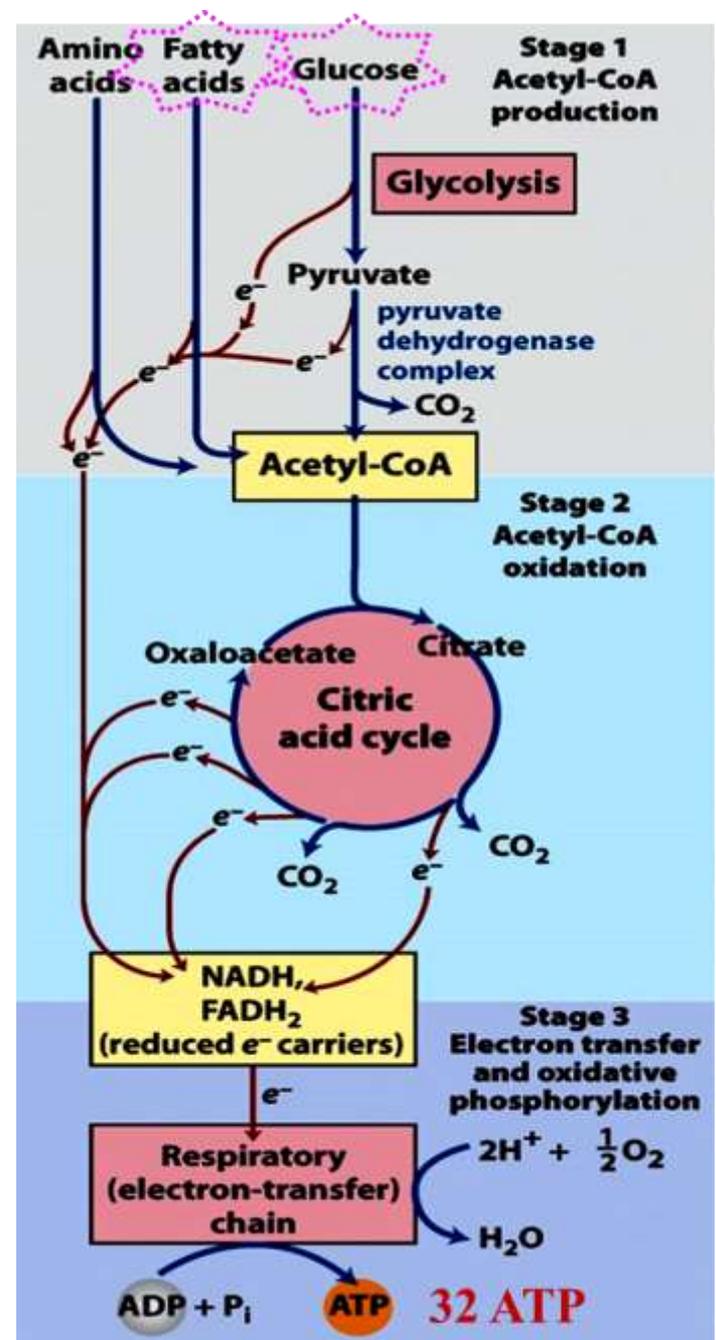
300-500 g di glucosio



Metabolismo ossidativo (aerobico)

Sostiene la produzione di energia in condizioni aerobiche nel lungo periodo (più di un minuto - distanza maggiore di 800 m)

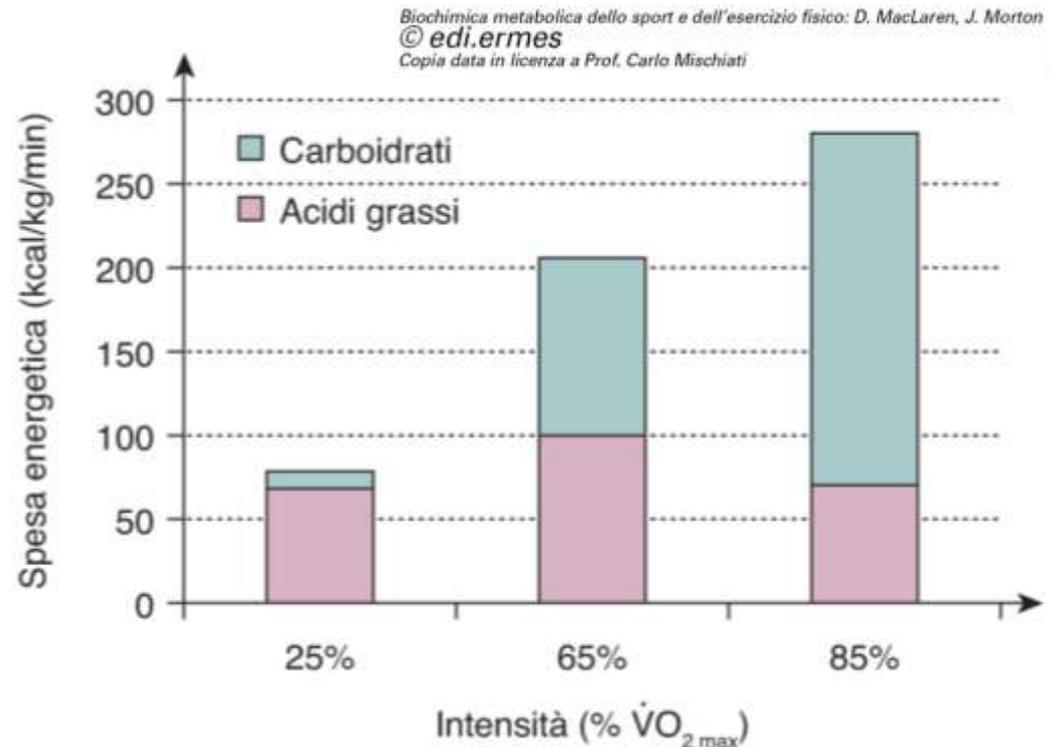
- **necessita della presenza di ossigeno (condizioni aerobiche)**
- le reazioni **avvengono nei mitocondri** delle cellule.
- l'energia viene prodotta dalla ossidazione completa del **glucosio**, degli **acidi grassi** e degli **aminoacidi** ad anidride carbonica e acqua e **ATP**.



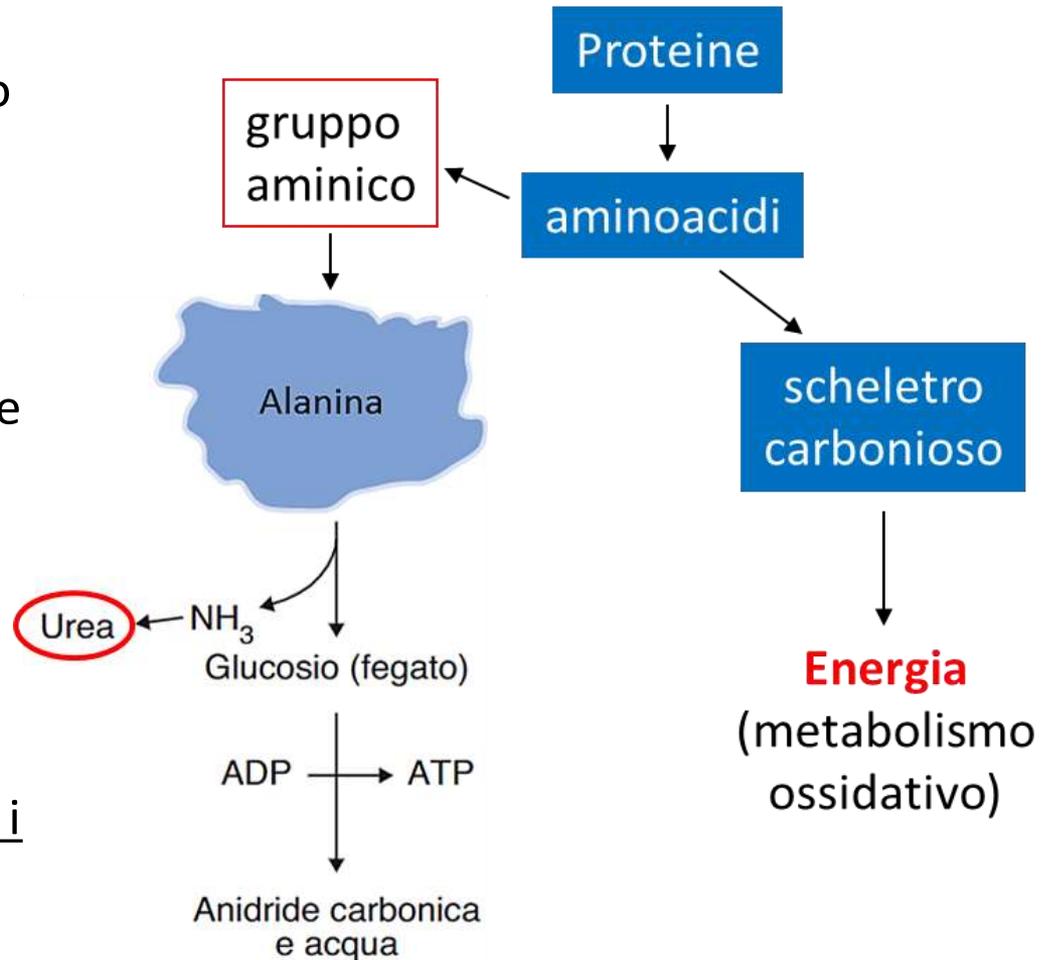
Nelle attività aerobiche ...

Il contributo dei carboidrati e dei grassi nella produzione di ATP dipende dal livello di intensità dell'esercizio

- ad un **livello di intensità** pari al **25%** $\dot{V}O_2$ max (p.e. durante una **camminata**) l'energia consumata deriva dai grassi (**80%**)
- al **65%** $\dot{V}O_2$ max (p.e. **corsa** a ritmo costante) il contributo dei grassi scende al **50%**
- all'**85%** $\dot{V}O_2$ max (p.e. **corsa intensa** ma in condizione aerobica) il contributo dei grassi scende al **25%**



- Durante l'**esercizio prolungato** o il **digiuno** cala la glicemia e gli aminoacidi del **muscolo** vengono utilizzati come fonte energetica (metabolismo ossidativo ... solo lo **scheletro carbonioso viene utilizzato**) e i gruppi aminici vengono spostati sul piruvato che diventa **alanina**.
- L'alanina esce dal muscolo e entra nel **circolo ematico** per arrivare **al fegato**.
- A livello epatico viene convertita i glucosio, attraverso la gluconeogenesi, che poi viene rilasciato nel sangue nel tentativo di ripristinare la glicemia (ciclo del glucosio-alanina).



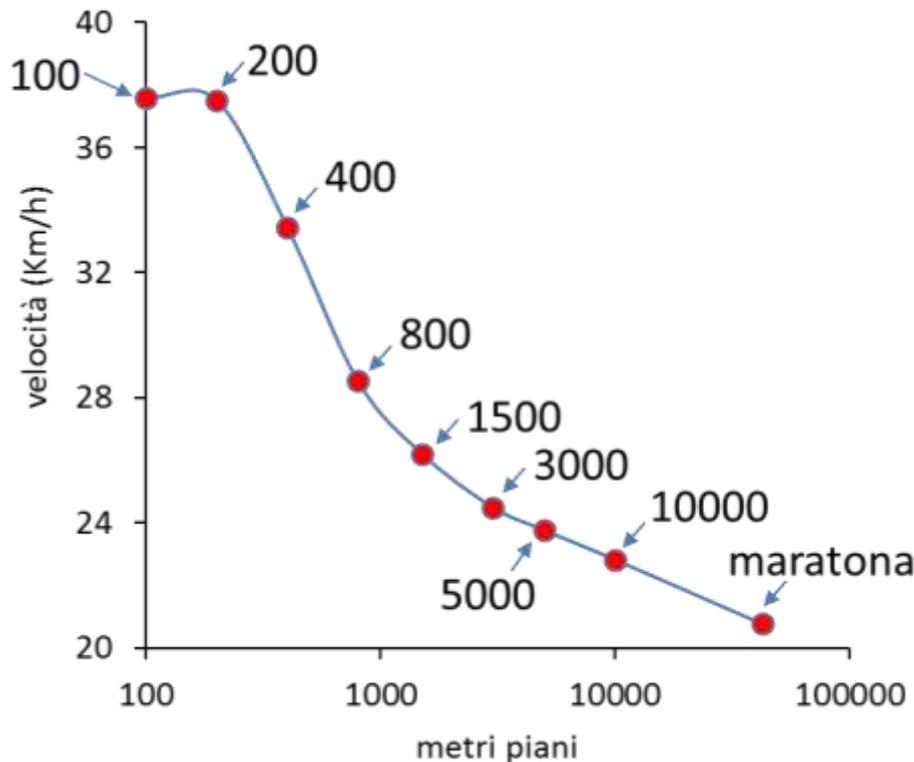
ciclo del glucosio-alanina

**Il meccanismo di
ricarica dell'ATP detta la
velocità di contrazione
della fibra (e dell'atleta)**

Se osserviamo i record del mondo di corsa su pista...

Le **velocità massime** dipendono dalla **distanza percorsa**

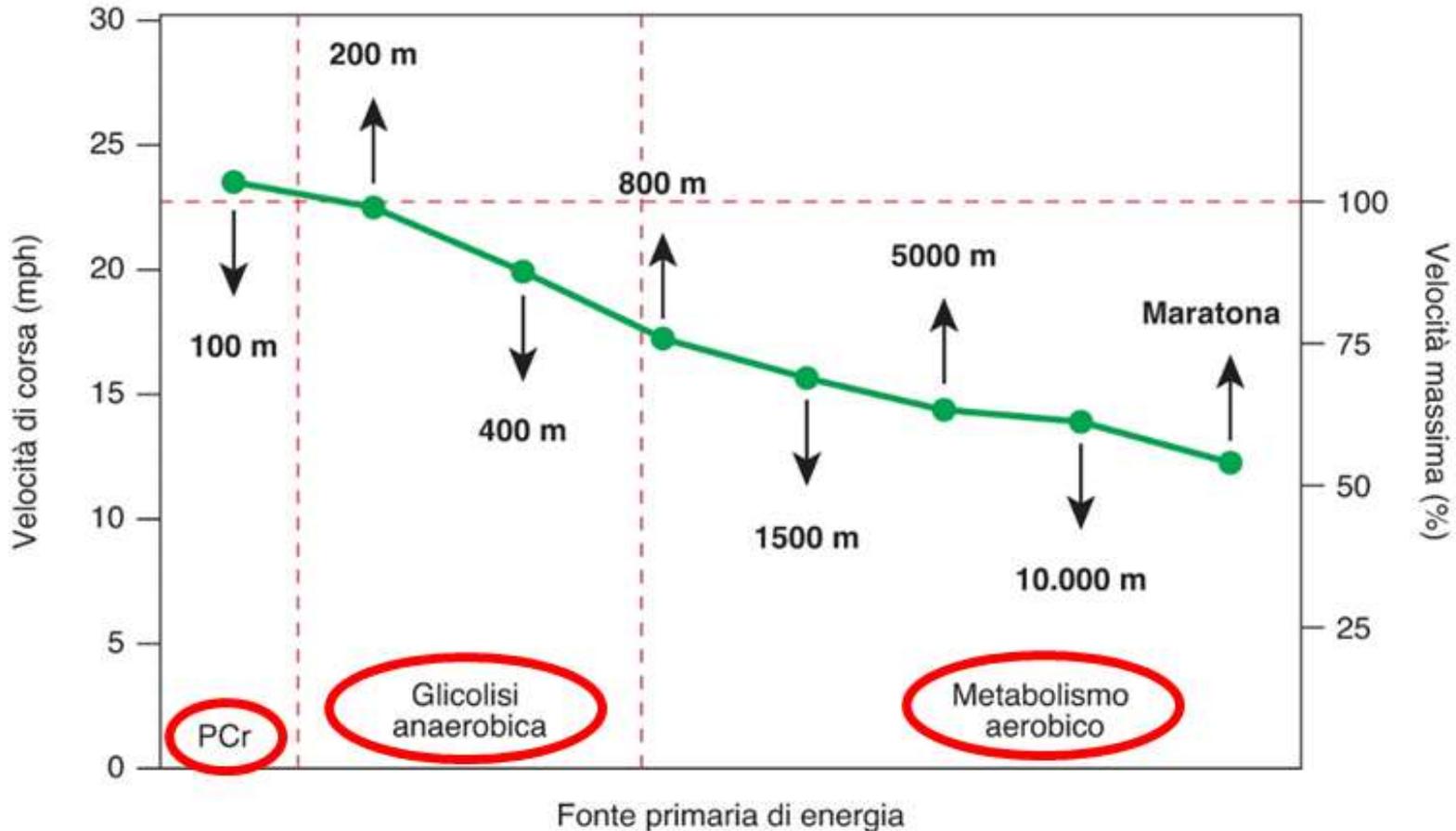
100 m	37,578 km/h	(Usain Bolt)
200 m	37,52 km/h	(Usain Bolt)
400 m	33,465 km/h	(Wayde van Niekerk)
800 m	28,54 km/h	(David Rudisha)
1.500 m	26,213 km/h	(Hicham El Guerrouj)
3.000 m	24,508 km/h	(Daniel Komen)
5.000 m	23,767 km/h	(Kenenisa Bekele)
10.000 m	22,82 km/h	(Kenenisa Bekele)
Maratona	20,776 km/h	(Eliud Kipchoge)



→ gli esseri umani possono mantenere una **velocità massima di corsa** per circa 200 m.

→ le **velocità medie** **diminuiscono** con l'aumentare della distanza

Le velocità massime della corsa dipendono dall'impiego di differenti fonti energetiche



Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico: D. MacLaren, J. Morton
© edi.ermes
Copia data in licenza a Prof. Carlo Mischiati

... ogni metabolismo di ricarica dell'ATP ha la sua velocità ...

	<i>Reazioni</i>	<i>velocità produzione ATP</i>
Creatina fosfato ▶	$\text{PCr} \rightarrow \text{ATP} + \text{Cr}$	9 millimoli/Kg/s
Glicolisi anaerobia ▶	$\text{CHO} \rightarrow \text{lattato} + \text{ATP}$	4 millimoli/Kg/s
Glicolisi aerobia ▶	$\text{CHO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ATP}$	2 millimoli/Kg/s
Metabolismo ossidativo ▶	$\text{A. grassi} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ATP}$	1 millimoli/Kg/s

Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico: D. MacLaren, J. Morton
© *edi.ermes*
Copia data in licenza a Prof. Carlo Mischiati

In cosa differiscono?

- **PCr** → **1** singola reazione
- **glicolisi anaerobia** → **10** reazioni
- **glicolisi aerobica** → **26** reazioni
- **metabolismo ossidativo degli acidi grassi** → **90-100** reazioni

minor numero
di passaggi



maggior rapidità
di ricarica

In **condizioni anaerobiche**

- Creatina fosfato 
- Glicolisi anaerobia 
- Glicolisi aerobia 

<i>Reazioni</i>	<i>velocità produzione ATP</i>
$\text{PCr} \rightarrow \text{ATP} + \text{Cr}$	9 millimoli/Kg/s
$\text{CHO} \rightarrow \text{lattato} + \text{ATP}$	4 millimoli/Kg/s
$\text{CHO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ATP}$	2 millimoli/Kg/s

- la sintesi di ATP mediante l'uso di **PCr** è la **più veloce in assoluto**.
- La **glicolisi anaerobica** vs **glicolisi aerobica** ... per i carboidrati la demolizione in condizione anaerobica ha una velocità doppia di quella aerobica.

In generale il metabolismo anaerobico ricarica più velocemente l'ATP muscolare



maggior ATP disponibile nell'unità di tempo

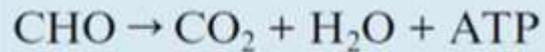


maggior velocità della corsa



maggior velocità di contrazione sarcomero

In **condizioni aerobiche** ...



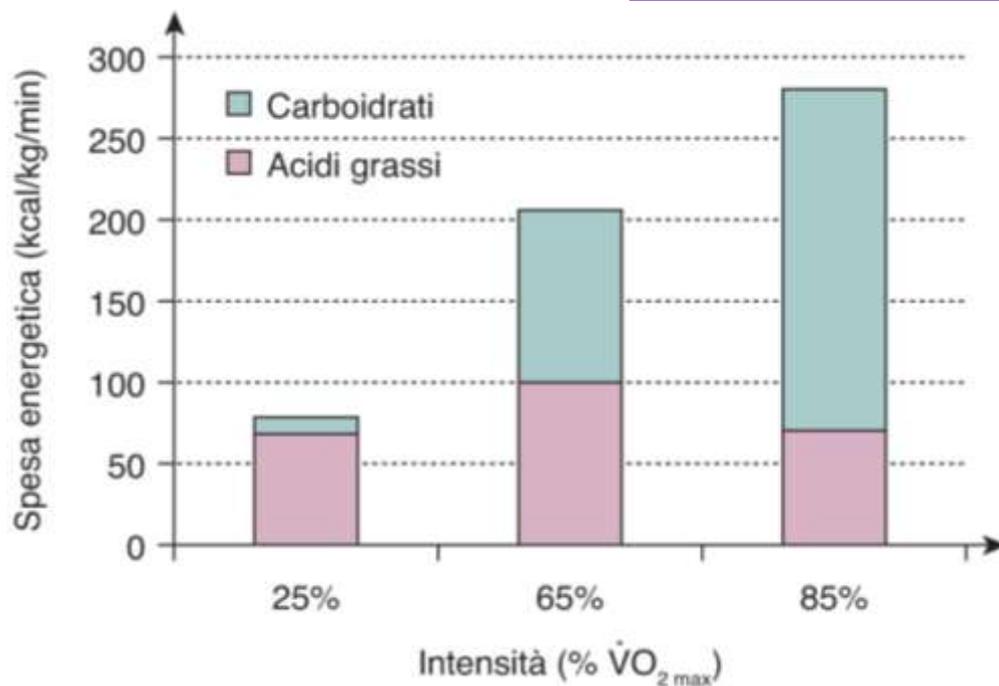
2 millimoli/Kg/s



1 millimoli/Kg/s

velocità doppia

i **carboidrati** ricaricano più velocemente l'ATP muscolare rispetto agli **acidi grassi**



maggior ATP disponibile nell'unità di tempo

maggior velocità di contrazione sarcomero

maggior velocità della corsa

carboidrati consumati in modo prioritario quando il ritmo è sostenuto

**Perché non si può
correre la maratona alla
velocità della gara dei
100 metri?**

Nelle **gare di velocità** la condizione di **esercizio** è **ANAEROBICO** →
fonti energetiche: **PCr** e **glicolisi anaerobica**

non si può
correre a
velocità
massima la
maratona
poiché ...

- il prodotto finale della glicolisi anaerobica è **l'acido lattico**...
- I **depositi muscolari di PCr e di carboidrati** nel muscolo e nel fegato (glicogeno) sono relativamente **limitati**...



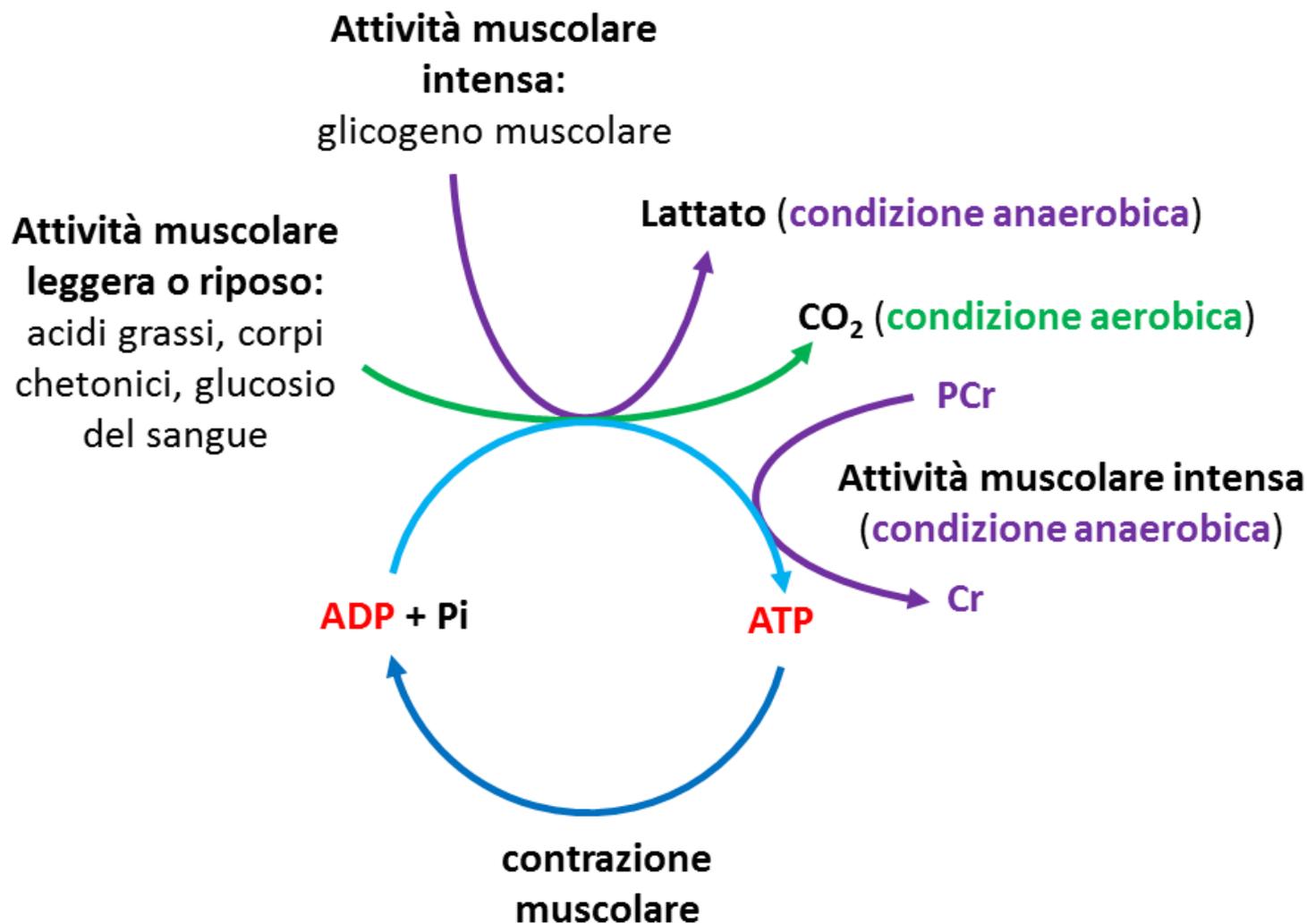
acidificazione dei muscoli
(riduce l'efficienza della glicolisi aumentando l'affaticamento)



finirebbero presto

la **spesa energetica di una maratona è elevata** → **è necessario l'apporto dell'ossidazione degli acidi grassi** che producono **ATP in abbondanza** → **velocità minore di questo metabolismo** → la **velocità della corsa diminuisce** ma la distanza percorsa aumenta.

In conclusione ... nel muscolo possono essere utilizzate differenti vie metaboliche per ricaricare l'ATP consumata durante l'esercizio, da cui dipende la velocità di esercizio dell'atleta



In questa lezione abbiamo imparato che ...

- **L'ATP è la molecola energetica che permette la contrazione muscolare, ma è in quantità limitata per cui deve essere ricaricata dal metabolismo energetico**
- **Carboidrati, lipidi e aminoacidi vengono impiegati come fonte energetica per la contrazione muscolare**
- **La velocità di contrazione della fibra non dipende solo dal tipo di MHC presente ma anche dal tipo di metabolismo impiegato per la ricarica dell'ATP**
- **Il metabolismo anaerobico supporta le maggiori velocità/potenza, il metabolismo aerobico supporta le maggiori distanze**

Materiale didattico di supporto

- Materiale delle lezioni sarà reperibile nel minisito dell'insegnamento; esso è utile come traccia degli argomenti svolti, ma non sostituisce il libro di testo
- Piattaforma on line Moodle: approfondimenti e test di autovalutazione

Raccomandazione importante: Il materiale delle lezioni è per USO PERSONALE dello studente iscritto al corso di Biochimica per le Scienze Motorie UniFE ed è fatto divieto di diffonderlo in qualsiasi maniera, potendo contenere immagini/filmati per i quali valgono i diritti di copyright.



Foto tratta da:
<https://www.my-personaltrainer.it>

Massimo consumo di ossigeno (VO₂ max)

La massima **potenza aerobica** equivale alla massima quantità di ossigeno che può essere utilizzata da un individuo nell'unità di tempo (h), nel corso di un'attività fisica coinvolgente grandi gruppi muscolari, di intensità progressivamente crescente protratta fino all'esaurimento.

«Il massimo consumo di ossigeno è **una misura** globale ed integrata **della massima intensità di esercizio che un soggetto può tollerare per periodi di tempo abbastanza lunghi**» (Cerretelli e Prampero, 1987).

Viene espressa come **VO₂ max** : il **massimo volume di ossigeno (mL) consumato per minuto per kg di peso corporeo.**

VO₂ max

- è un **consumo di O₂ espresso in rapporto al peso corporeo** (ml O₂/kg/min)
- varia per fascia di età
- è una caratteristica genetica
- viene **modificato dall'allenamento** e può incrementare il suo valore del 10 - 25%
- è inferiore nelle femmine rispetto ai maschi (femmine, da 20 a 29 anni: 35-43 ml/kg/min; maschi, da 20 a 29 anni: 44-51 ml/kg/min)



può essere misurato direttamente mediante l'impiego di sofisticate e costose attrezzature, che richiedono personale altamente specializzato, oppure attraverso metodiche indirette, accessibili a tutti sulle macchine cardiofitness (generalmente si utilizzano cyclette o tapis roulant).

L'esercizio aumenta i livelli di leucina in tutto il corpo (anche ematici).

Tuttavia, il contributo della leucina come substrato di energia muscolare è molto piccolo, essendo dal 3 al 4% a riposo e addirittura inferiore (1%) durante l'esercizio.

David A. Hood & Ronald L. Terjung Amino acid metabolism during exercise and following endurance training. *Sports Medicine* volume 9, pagine 23–35(1990)

Biochimica metabolica dello sport e dell'esercizio fisico: D. MacLaren, J. Morton
© edi.ermes
Copia data in licenza a Prof. Carlo Mischiati

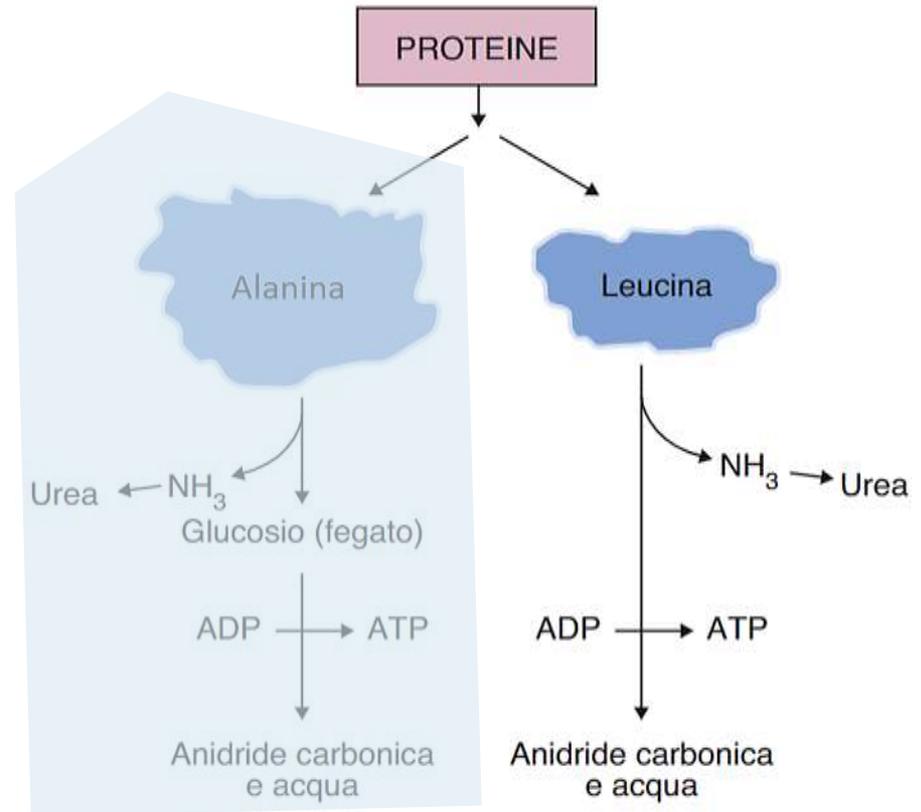


Figura 1.8 - Uso di aminoacidi per produrre energia.