

METABOLISMO ENERGETICO E PRESTAZIONE 3

Modulo 1

Energetica muscolare durante esercizio:

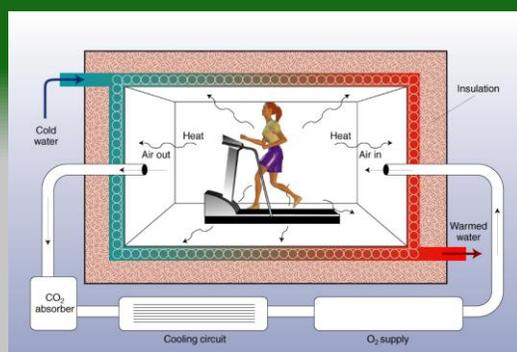
Concetti di Energia, Lavoro, Potenza. Fonti energetiche. Metabolismo anaerobico alattico e lattacido. **Soglia anaerobica. Metabolismo aerobico. Restauro dall'esercizio. Ricostruzione delle riserve energetiche. Rimozione dell'acido lattico. Misurazione del costo energetico dell'esercizio e del rendimento. Massimo consumo di ossigeno.** Adattamenti energetici muscolari da allenamento aerobico e anaerobico. Fibre muscolari e differenti tipi di unità motorie: utilizzazione durante la prestazione.

La Misura del Costo energetico dell'Esercizio

Calorimetria Diretta — misura la produzione di calore da parte dell'organismo al fine di calcolare la spesa energetica.

Calorimetria Indiretta — calcola la spesa energetica a partire dalla misura del VO_2

CAMERA CALORIMETRICA



MISURA DEGLI SCAMBI GASSOSI RESPIRATORI



Misura del Costo Energetico dell'Esercizio

$\dot{V}O_2$ —volume di O_2 consumato per minuto (L/min).

$\dot{V}CO_2$ —volume di CO_2 prodotta per minuto (L/min).

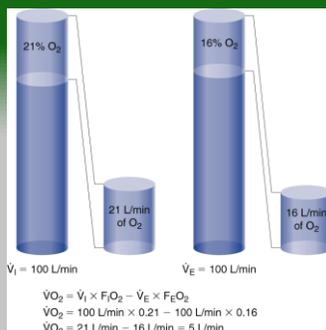
$$\dot{V}O_2 = (\dot{V}_I \times F_I O_2) - (\dot{V}_E \times F_E O_2)$$

$$\dot{V}CO_2 = (\dot{V}_E \times F_E CO_2) - (\dot{V}_I \times F_I CO_2)$$

Dove:

\dot{V}_E = ventilazione espirazione; \dot{V}_I = ventilazione inspirazione; $F_I O_2$ = frazione O_2 inspirato; $F_I CO_2$ = frazione di CO_2 inspirata; $F_E O_2$ = frazione O_2 espirato; $F_E CO_2$ = frazione di CO_2 espirata.

CALCOLO DEL CONSUMO DI OSSIGENO



Rapporto di Scambio Respiratorio (RER)

• Rapporto tra CO₂ liberata ($\dot{V}CO_2$) e ossigeno introdotto ($\dot{V}O_2$)

$$\bullet \text{ RER} = \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$$

• Il valore di RER a riposo di norma è compreso tra 0.78 e 0.80

• RER può essere usato per determinare il substrato energetico usato a riposo e durante esercizio, con un valore di 1.00 che indica CHO e 0.70 che indica lipidi.



Equivalenza calorica del RER e % kcal derivate da Carboidrati e Lipidi

RER	Energia		% kcal	
	kcal/L O ₂	Carboidrati	Lipidi	
0.71	4.69	0.0	100.0	
0.75	4.74	15.6	84.4	
0.80	4.80	33.4	66.6	
0.85	4.86	50.7	49.3	
0.90	4.92	67.5	32.5	
0.95	4.99	84.0	16.0	
1.00	5.05	100.0	0.0	

RER and RQ

• RER-Respiratory Exchange Ratio • RQ-Respiratory Quotient

– Ventilatory measurement

– Reflects gas exchange between lungs and pulmonary blood

– Exceeds 1.0 during heavy exercise due to buffering of lactic acid which produces CO₂

– Cellular Respiration and substrate utilization

- 0.7 = Fat
- 1.0 = Carbohydrate
- 0.8 = Protein

– Equivalent to RER only under resting or steady-state conditions

– Can never exceed 1.0

– RQ is used to estimate energy expenditure, however, when RQ is not available, assume 5 kcal •L⁻¹



Key Points Misura della spesa energetica durante esercizio

- La calorimetria diretta misura il calore prodotto dal corpo mentre la calorimetria indiretta stima la spesa energetica a partire dal consumo di O_2 .
- Il RER può essere utilizzato per determinare il tipo di combustibile ossidato ed è impiegato nel calcolo dell'energia spesa per litro di O_2 consumato.

Portata Metabolica

- Portata alla quale l'organismo trasforma energia a riposo e durante esercizio
- Misurata come consumo di ossigeno dell'intero organismo e suo equivalente calorico
- La portata metabolica di base o di riposo (metabolismo basale, BMR) è il quantitativo minimo di energia richiesto per il mantenimento delle funzioni fisiologiche fondamentali (varia tra 1,200 e 2,400 kcal/24 hr)
- L'energia minima richiesta per le normali attività giornaliere è compresa tra 1,800 e 3,000 kcal/24 hr



Fattori che Influenzano BMR/RMR

- Maggiore la **massa magra**, più elevato il BMR
- Maggiore la **superficie corporea**, più elevato il BMR
- BMR diminuisce gradualmente all'aumentare dell'**età**
- BMR aumenta all'aumentare della **temperatura corporea**
- Più elevato il livello di **stress**, più elevato BMR
- Maggiori i livelli di **tirosina** ed **adrenalina**, più elevato il BMR

Equivalenti Calorici

♦ Equivalenti energetici degli alimenti

CHO:	4.1 kcal/g
Fat:	9.4 kcal/g
Protein:	4.1 kcal/g

♦ Energia per litro di ossigeno consumato

CHO:	5.0 kcal/L	} Media = 4.8 kcal/L
Grassi:	4.7 kcal/L	
Proteine:	4.5 kcal/L	

Esempio: $\dot{V}O_2$ riposo = $0.300 \text{ L/min} \times 60 \text{ min/hr} \times 24 \text{ hr/die}$
 = $432 \text{ L/die} \times 4.8 \text{ kcal/L} = 2,074 \text{ kcal/die}$

Energetica del lavoro muscolare

• Metabolismo di riposo

- Processi ossidativi → risintesi ATP
- $\dot{V}O_2 = 4 \text{ ml kg}^{-1}\text{min}^{-1} \rightarrow 200\text{-}300 \text{ ml min}^{-1}$
- Muscolo → 20-30% MR

• Esercizio

- Muscolo → 90% MR
- Stato Stazionario → $\dot{V}O_2 \propto$ Intensità

Il combustibile del lavoro aerobico

• Utilizzazione dei Glucidi

- Riposo → 25% Esercizio → 90%
- A stato stazionario è tanto minore quanto minori sono le riserve di glicogeno
- Diminuisce con lo stato stazionario
- Nei soggetti ALLENATI, a parità di carico, è MINORE che nei SEDENTARI

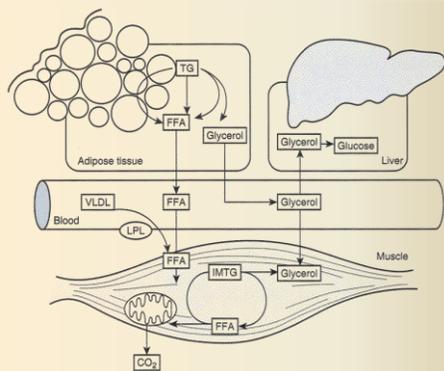
$$c = d\text{ATP}/d\text{VO}_2 = 4.13 + 2.07 \text{ QR}$$

Il combustibile del lavoro aerobico

• Utilizzazione dei LIPIDI

- *Dopo quanto appena detto, potrebbe sembrare che ci sia ben poco spazio per i lipidi nella dieta di un atleta...*
- Lipidi più importante fonte **energetica** durante esercizio!
- Aumento capacità di **ossidare lipidi** migliora la prestazione.
- Il mantenimento della **disponibilità** di lipidi (scorte TAG) è importante (dieta).
- E' importante anche la **capacità di mobilizzare** i lipidi durante esercizio (allenamento).

Overview of Fat Metabolism



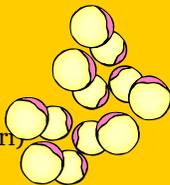
Fattori che influenzano la disponibilità e l'utilizzazione dei lipidi

- Livello di fitness
- Tipo di esercizio
- Intensità/Durata dell'esercizio
- Riserve lipidiche muscolari disponibili
- Capacità di mobilizzazione/trasporto
- Composizione del pasto pre-esercizio
- Disponibilità di scorte endogene e/o esogene di CHO



Fonti di substrati lipidici

- Tessuto Adiposo
 - Sottocutaneo
 - Viscerale profondo
- Lipidi muscolari (intramuscolari)
- Lipoproteine ematiche
 - Chilomicroni
 - Lipoproteine a bassa densità (LDL)
- Fornitura esogena di lipidi durante esercizio

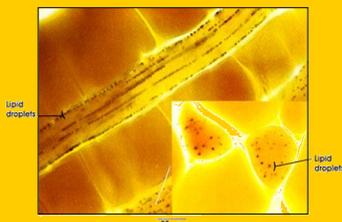


Tessuto Adiposo

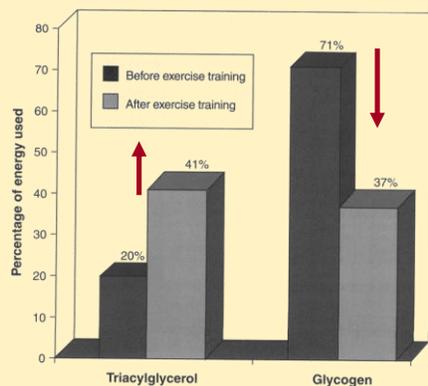
- Il **tessuto adiposo** sottocutaneo costituisce la maggiore riserva di energia corporea
- Per poter utilizzare i lipidi come fonte energetica durante esercizio, è necessario disporre di sistemi di mobilizzazione e trasporto dei lipidi al muscolo

Trigliceridi muscolari

- Possono essere una fonte importante di TAG e FFA durante esercizio (5-35%)
- Livello individuale di fitness
- Protocollo di esercizio
- Tecnica di misura
- Reclutamento di UM
- Altro?



Trigliceridi intramuscolari e allenamento AEROBICO



Trigliceridi intramuscolari e allenamento

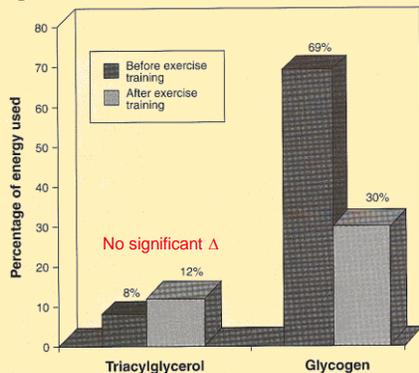
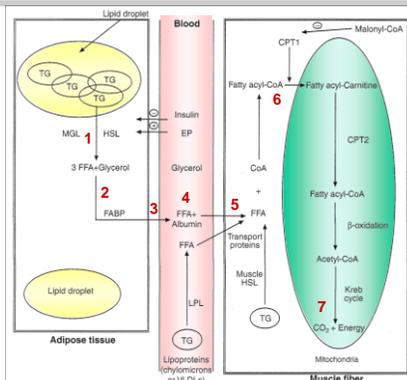


Figure 5.10 Percentage of intramuscular triacylglycerol and glycogen used for energy before and after a 12-week exercise training program using trained and untrained limbs (knee extensions with only one leg).

Use of Fat During Exercise

1. Degradazione del triacilglicerolo ad acidi grassi liberi (FFA) e glicerolo.
2. Mobilizzazione e trasporto di FFA all'interno delle cellule adipose.
3. Trasporto degli FFA dagli adipociti al sangue.
4. Trasporto ematico degli FFA.
5. Trasporto degli FFA nelle fibre muscolari.
6. Trasporto degli FFA ai mitocondri muscolari.
7. Ossidazione attraverso il CAT.

Use of Fat During Exercise



Re-esterificazione degli FFA

- Se gli FFA non sono necessari a fini energetici, possono essere **re-esterificati in TAG** nel tessuto adiposo o nel fegato.
- A riposo, il 70-75% degli FFA sono **re-esterificati**.
- Durante esercizio, la lipolisi è accelerata e la re-esterificazione molto ridotta (< 25%).
- A **riposo**, la concentrazione ematica di FFA è **bassa**.
- Durante **esercizio**, la concentrazione ematica di FFA è **fortemente elevata**.

9/6/2012

Summer I, 2005

25

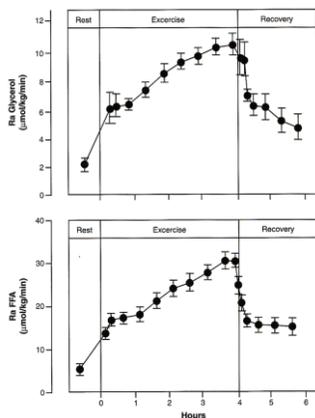
Esercizio e Lipolisi

- Esercizio un potente stimolante!
 - Concentrazione ematica di FFA ↑
 - 0.2 – 0.4 mmol/L (riposo) → 2-8 mmol/L (esercizio)
 - Concentrazione ematica di glicerolo ↑
 - RER ↓
- Portata della lipolisi > portata di ossidazione muscolare di FFA

9/6/2012

Summer I, 2005

26



Cinetica di comparsa del glicerolo e di FFA a riposo, durante esercizio e recupero in 5 uomini.



40% VO_{2max} for 4 h

L'esercizio ha prodotto un incremento di **sei volte** degli FFA disponibili per l'ossidazione.

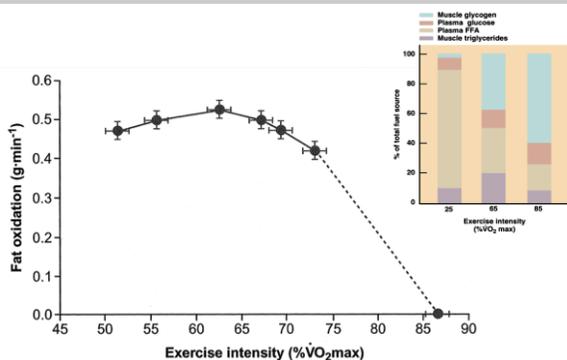
Wolfe et al., 1990.

9/6/2012

Summer I, 2005

27

Ossidazione dei Grassi ed Intenità dell'Esercizio



9/6/2012

Summer I, 2005

28

Allenamento

“L'allenamento permette ad una persona di lavorare più duramente (maggiore consumo di ossigeno), laddove utilizzi più lipidi per le trasformazioni energetiche (sia da FFA plasmatici che da TAG intramuscolare) e meno glicidi (glucosio ematico e glicogeno).”



“Prescrivere (raccomandare) allenamento è il migliore intervento che si possa fare per migliorare la capacità individuale a metabolizzare lipidi.”

9/6/2012

Summer I, 2005

29

Generalizzazione dei Risultati Sperimentali

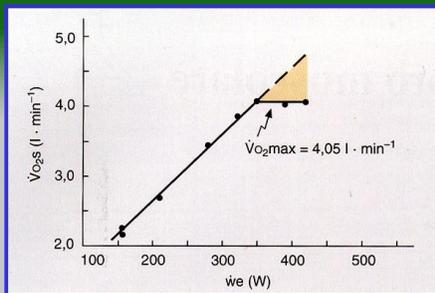
- Un pasto ricco di lipidi assunto immediatamente prima dell'esercizio non ha alcun effetto sulla prestazione.
- Diete ricche di lipidi a breve termine (3-5 gg) compromettono la prestazione.
- Diete ricche di lipidi a medio termine (2-4 sett) non hanno effetto.
- Diete ricche di lipidi a lungo termine (≥ 7 sett) compromettono la prestazione.
- L'infusione di lipidi durante esercizio diminuisce l'utilizzazione del glucosio ma ha un effetto pratico limitato

9/6/2012

Summer I, 2005

30

Stato Stazionario 2



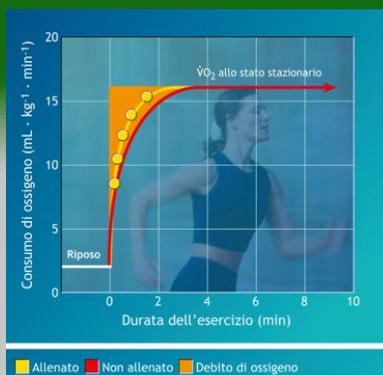
Stato Stazionario 1

L'energetica del lavoro muscolare è descritta da:

$$ATP = c \dot{V}_{O_2} s$$

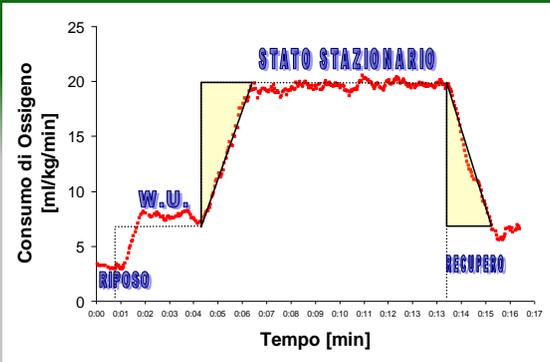
- Dove **ATP** indica il n° di moli ricostituite nell'unità di tempo e **c** quelle ricostituite per mole di ossigeno consumato (5.6 – 6.2)

Fasi transienti e Debito di O₂

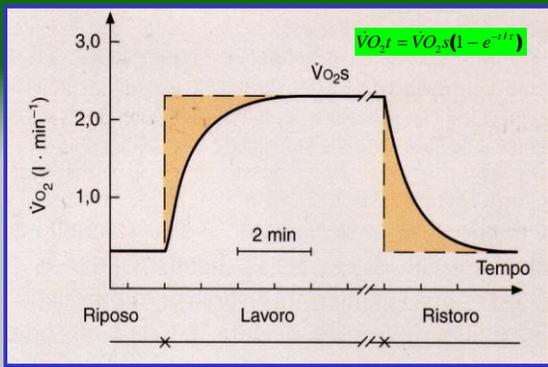


■ Allenato ■ Non allenato ■ Debito di ossigeno

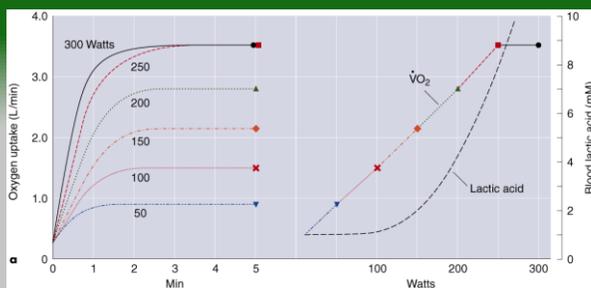
Stato Stazionario 3



Fasi transienti e Debito di O₂

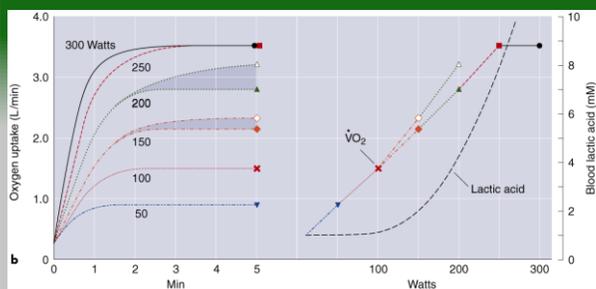


VO₂ vs POTENZA (1986)

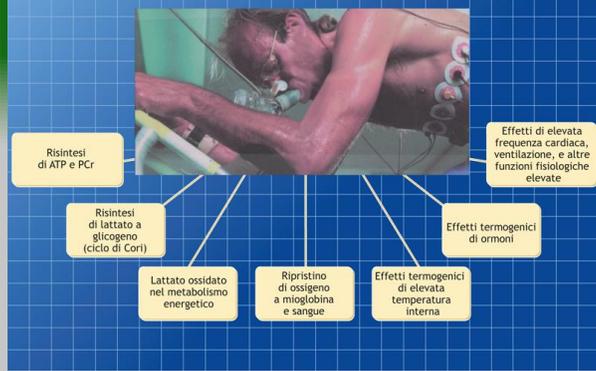


VO₂ vs POTENZA (1996)

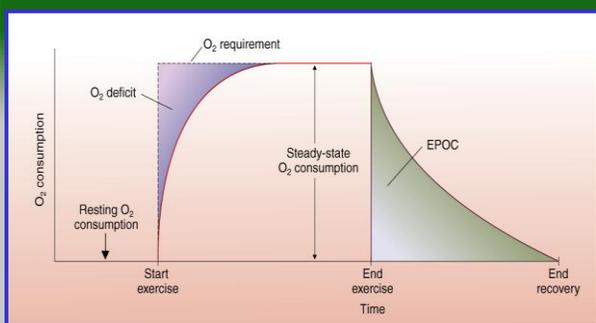
Fig 14.4.a,b



EPOC a seguito di esercizio massimale



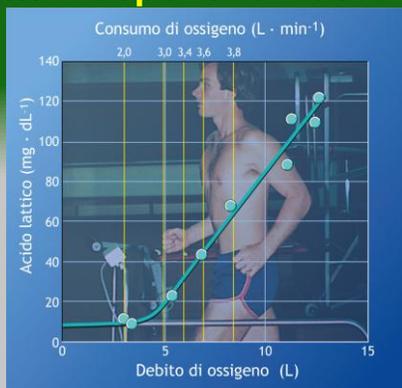
DEBITO DI OSSIGENO ED EPOC



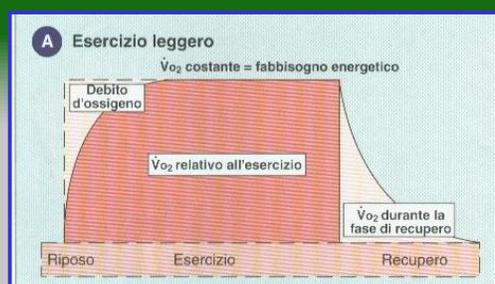
Fattori responsabili dell'EPOC

- Ricostituzione delle scorte di ATP
- Allontanamento del lattato prodotto dal metabolismo anaerobico
- Restituzione dell'O₂ preso a prestito da emoglobina e mioglobina
- Rimozione della CO₂ accumulata nei tessuti corporei
- Aumento della portata metabolica e della frequenza respiratoria indotti dall'incremento di temperatura e dei livelli ematici di catecolamine circolanti

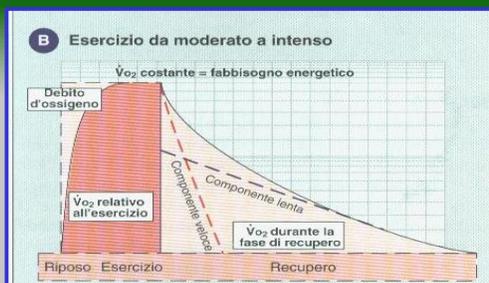
Fattori responsabili dell'EPOC



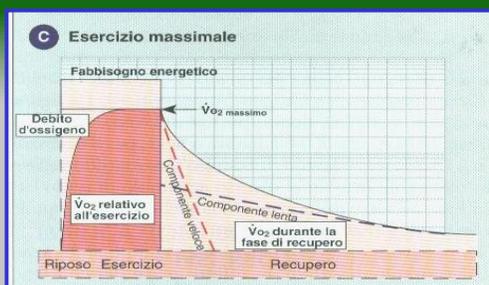
Il Restauro dall'esercizio



Il Restauro dall'esercizio



Il Restauro dall'esercizio



Il recupero

A.V. Hill (1922, 1933): → Debito di Ossigeno

- Componente **lattacida**
- Componente **alattacida**

Il pagamento del debito serve:

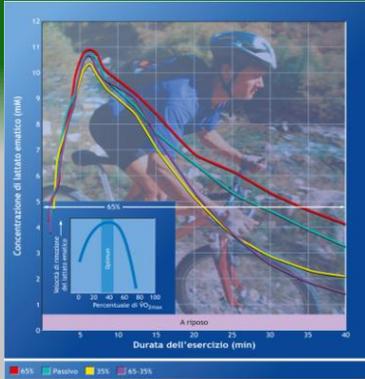
- Ricostituire le scorte di glicogeno a partire dal lattato (80% **ciclo di Cori**)
- Lattato → Piruvato → **ciclo di Krebs**



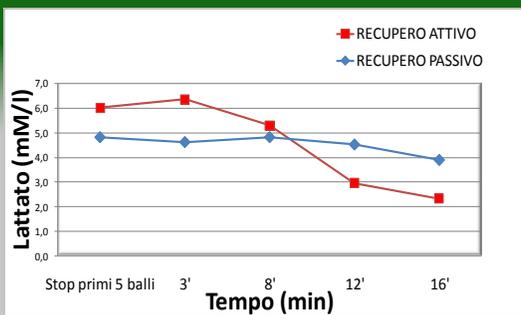
MODELLO ESPLICATIVO ATTUALE (EPOC)

- Resintesi di ATP e CP
- Resintesi di glicogeno a partire dal lattato
- Ossidazione del lattato
- Riossigenazione del sangue
- Temperatura corporea
- Ormoni (catecolamine)

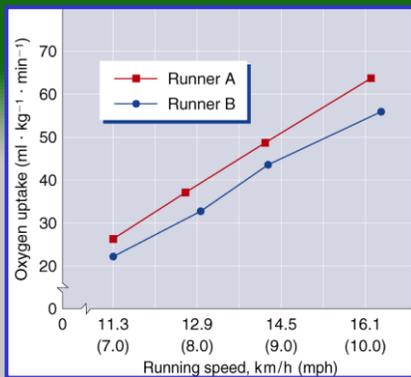
Il recupero: Quali implicazioni per l'allenamento?



Il recupero: Quali implicazioni per l'allenamento?



RICHIESTA DI OSSIGENO DI DUE CORRIDORI



Determinanti del successo nelle prestazioni di resistenza

- Elevata massima potenza aerobica ($\dot{V}O_2\text{max}$)
- Elevata soglia lattato
- Elevata economia dell'esercizio
- Elevata percentuale di fibre ST

Fattori che Influenzano il Costo Energetico

- | | |
|-----------------------|--|
| • Tipo di attività | • Dimensione, Massa, Composizione corporea |
| • Livello di attività | • Intensità dell'attività |
| • Età | • Durata dell'attività |
| • Genere | • Efficienza del movimento |



Key Points

Spesa energetica a riposo e durante esercizio

- Il metabolismo basale (BMR) corrisponde al minimo di energia richiesta per il funzionamento delle funzioni fisiologiche di base.
- Il metabolismo di riposo (RMR) è abbastanza bene approssimato da quello basale BMR.
- La portata metabolica aumenta all'aumentare dell'intensità dell'esercizio.
- Il consumo di ossigeno aumenta all'aumentare dell'intensità dell'esercizio sino al suo massimo ($\dot{V}O_2\text{max}$).

(continua)

Key Points

Spesa energetica a riposo e durante esercizio

• Si definisce consumo di ossigeno in eccesso post esercizio (EPOC) l'incremento del consumo di O_2 al di sopra dei livelli di riposo al termine dell'esercizio; è causato da un effetto combinato di diversi fattori

• La soglia lattato è il punto in corrispondenza del quale il lattato ematico comincia ad accumularsi al di sopra dei valori di riposo durante esercizio, ovvero la produzione eccede lo smaltimento

(continua)

Key Points

Spesa energetica a riposo e durante esercizio

• Individui con più elevata soglia lattato, espressa in funzione della percentuale di VO_{2max} , ottengono le migliori prestazioni di resistenza.

• I miglioramenti della prestazione spesso sono indicati dal fatto che l'atleta è capace di maggiori durate di esercizio a più elevati valori percentuali di VO_{2max} .

• La capacità di prestazione può essere migliorata intervenendo sull'economia dell'esercizio.

La Fatica e le sue cause

• Deplezione di fosfocreatina (PCr)

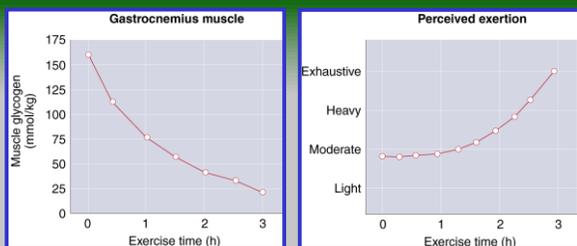
• Deplezione di glicogeno (specialmente in attività che durino più di 30 minuti)

• Accumulo di lattato e H^+ (specialmente in attività più brevi di 30 minuti)

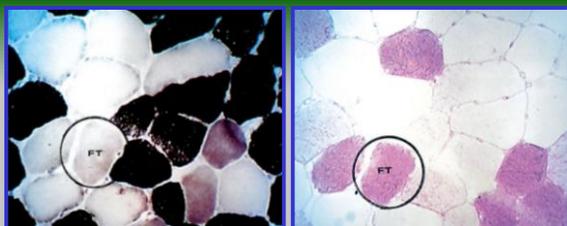
• Fatica neuromuscolare



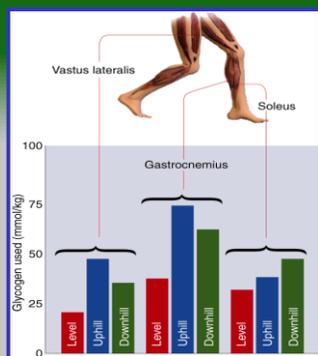
USO DEL GLICOGENO MUSCOLARE DURANTE ESERCIZIO



COLORAZIONE DELLE FIBRE MUSCOLARI PER IL GLICOGENO



USO DEL GLICOGENO DURANTE LA CORSA

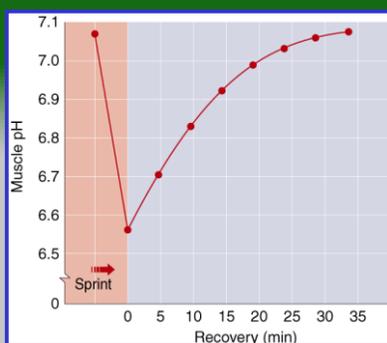


Metaboliti e Fatica

- Attività di breve durata dipendono dalla glicolisi anaerobica e favoriscono la produzione di lattato e H^+ .
- Le cellule tamponano gli H^+ con bicarbonato (HCO_3^-) al fine di mantenere il pH cellulare tra 6.4 e 7.1.
- Un pH intercellulare minore di 6.9, tuttavia, rallenta la glicolisi e la produzione di ATP.
- Quando il pH raggiunge 6.4, la concentrazione di H^+ blocca la glicolisi e causa l'esaurimento.



MODIFICAZIONI DEL pH MUSCOLARE



Key Points

Cause della Fatica

- Fatica può derivare dalla deplezione della PCr o del glicogeno, il che, a sua volta, compromette la ricarica di ATP.
- Gli H^+ generati dall'acido lattico provocano fatica poiché fanno diminuire il pH muscolare ed alterano i processi cellulari di liberazione di energia e contrazione muscolare.
- L'interruzione della trasmissione nervosa potrebbe essere una causa di alcune forme di fatica.
- La percezione della fatica da parte del SNC potrebbe essere un meccanismo protettivo.
