

“COSTO ENERGETICO SU DIVERSI TIPO DI ERGOMETRI”

dott. Filippo Balestreri

OBIETTIVO

Misurare il COSTO ENERGETICO durante esercizi eseguiti su ergometri differenti e verificarne l'eventuale differenza.

PREREQUISITI

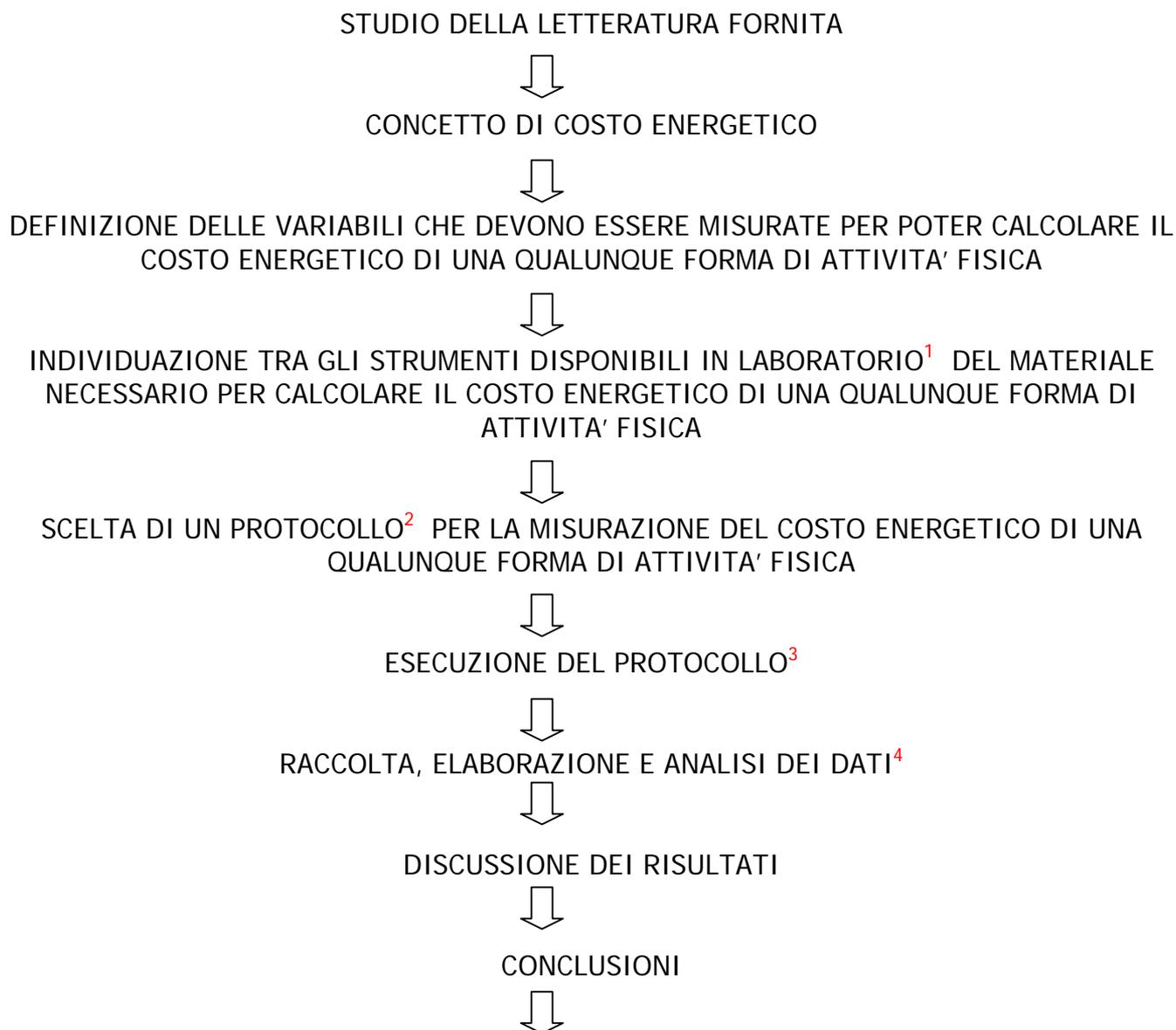
- Conoscenza della basi della energetica del lavoro muscolare (vie metaboliche aerobiche e anaerobiche);
- conoscenza dei concetti di massima potenza aerobica e soglia anaerobica;
- conoscenza dei concetti di “fasi transienti” e “debito di ossigeno” relativi ad esercizi svolti ad intensità costante;
- conoscenza delle nozioni di base per la gestione di un foglio di calcolo in Excel (apertura, salvataggio, calcolo della media, esecuzione di grafici)

PREPARAZIONE ALL'ESPERIENZA

Acquisizione delle informazioni e delle conoscenze necessarie relative all'argomento dell'esercitazione (materiale didattico allegato) al fine di:

- 1) formulare un'ipotesi su quali variabili (fisiche, metaboliche, ventilatorie, cardiocircolatorie...) debbano essere misurate e monitorate al fine di misurare il costo energetico di una qualunque forma di esercizio.
- 2) definizione di un protocollo per la misurazione del costo energetico di una qualunque forma di esercizio.

SCHEMA DI LAVORO CONSIGLIATO E FASI DELL'ESERCITAZIONE



RELAZIONE SCRITTA DEL LAVORO SVOLTO

1 Strumenti disponibili in laboratorio: METABOLIMETRO; CARDIOFREQUENZIMETRO, SPETTROSCOPIO NEL VICINO INFRAROSSO; SPIROMETRO; LATTACIDOMETRO; CRONOMETRO; CELLA DI CARICO; PLICOMETRO; SFIGMOMANOMETRO; PEDANA DI FORZA; ELETTROCARDIOGRAFO.

2: TIPI DI PROTOCOLLO: INCREMENTALE (a rampa, step della durata di 1 minuto, step della durata di 2 minuti, step della durata di 3 minuti); A CARICO COSTANTE(onda quadra o rettangolare; trapezoidale).

3: per l'esecuzione della prova è necessario un volontario in tenuta sportiva.

4: I DATI OTTENUTI DALL'ESPERIMENTO VERRANNO TRASFERITI IN UN FILE FORMATO EXCEL. OGNI COMPONENTE DEL GRUPPO DI RICERCA NE RICEVERA' COPIA.

MATERIALE BIBLIOGRAFICO

- "FISIOLOGIA DELL'UOMO" AA vari, edi-ermes; capitoli 22 e 23
- "FISIOLOGIA DELL'ESERCIZIO. Sport, ambiente, età, sesso", P. Cerretelli; Società Editrice Universo – Roma; capitolo 3
- "VALUTAZIONE DELL'ATLETA. Analisi funzionale e biomeccanica della capacità di prestazione". A. Dal Monte, M. Faina; UTET; capitoli 6 e 11.
- "Energetics of best performances in track cycling". C. Capelli, F. Schena, P. Zamparo, A. Dal Monte, M. Faina, P. di Prampero. *Medicine & Science in Sport & Exercise*: 1997;614-624.

COSTO ENERGETICO E MOVIMENTO

Le velocità massime nelle differenti forme di locomozione variano da un minimo di poco più di 7 km/h (nuoto: 50 m stile libero) a oltre 70 km/h (ciclismo: 20 m lanciati su pista) a dispetto del fatto che la massima potenza muscolare negli atleti di alto livello non presenta enormi differenze. Le suddette differenze di velocità non possono pertanto essere attribuite alla macchina uomo che, in ogni caso, eroga approssimativamente la stessa potenza massima ma dipendono da quell'insieme di caratteristiche intrinseche a ciascuna forma di locomozione che ne determina il COSTO ENERGETICO (CE).

SIGNIFICATO DEL COSTO ENERGETICO

Il CE rappresenta la quantità di energia necessaria per percorrere una distanza unitaria.

La misurazione del costo energetico delle differenti forme di attività fisica (non solo in ambito sportivo ma anche lavorativo) risulta senza dubbio utile per definirne l'impegno metabolico o il fabbisogno calorico.

Ancor più interessante, inoltre, è la possibilità di utilizzare il CE nello sport, come indicatore dello "stile" dell'atleta, essendo il soggetto più economico quello con una "armonia" di movimento e una coordinazione neuromuscolare migliore. Questa considerazione supporta l'ipotesi che la misura del CE possa fornire indicazioni sulle capacità di prestazione dell'atleta, in quanto a parità di potenza metabolica (consumo di ossigeno), minore risulta il CE, maggiore sarà la potenza meccanica sviluppata (Di Prampero, 1986).

Strettamente connesso al concetto di costo energetico risulta il concetto di **RENDIMENTO** o **EFFICIENZA**. Con tale termine si indica la percentuale di energia spesa che viene effettivamente trasformata in lavoro meccanico esterno. Il rendimento viene rappresentato dal rapporto tra la potenza meccanica espressa (ad esempio: watt al cicloergometro) e la potenza metabolica impiegata (ad esempio: $V'O_2$).

Il rendimento del nostro organismo è sensibilmente inferiore al 100%, poiché gran parte dell'energia consumata durante l'attività fisica viene dissipata sotto forma di calore e solo una frazione minore viene trasformata in lavoro esterno. Mediamente, l'efficienza della locomozione umana (cammino, corsa, ciclismo) oscilla tra il 20 e il 30%.

Come è già stato detto, il CE rappresenta la quantità di energia necessaria per percorrere una distanza unitaria.

IN CHE MODO VIENE UTILIZZATA L'ENERGIA SPESA?

Viene utilizzata per:

- vincere la RESISTENZA dell'ARIA o dell'ACQUA
- vincere FORZE GRAVITAZIONALI (sollevamento/abbassamento baricentro corporeo)
- vincere FORZE INERZIALI (accelerazione/decelerazione baricentro corporeo)
- vincere l'attrito del punto di contatto con il terreno (ruota, pattini)
- contrazione muscolare necessarie al mantenimento della postura
- sostenere l'ATTIVITA' CARDIACA e dei MUSCOLI RESPIRATORI
- vincere il carico interno (energia spesa per vincere le resistenze al movimento degli arti)

COME SI MISURA IL COSTO ENERGETICO?

L'unità di misura nel S.I. del LAVORO è il JOULE (1J = lavoro svolto quando il punto di applicazione della forza di un N è spostato di 1 metro lungo la direzione della forza = 1 Newton · 1 metro). Il CE viene espresso generalmente in kJ/km.

Poiché 4.185 kJ equivalgono a 1 kcal e 1 litro di ossigeno consumato nell'organismo umano sviluppa circa 5 kcal o 20.92 kJ, il CE può essere espresso anche come consumo di ossigeno o kcal per distanza unitaria (litri di O₂/km).

1 kcal	=	4.185 kJ	
1 L di O₂	=	5 kcal	= 20.92 kJ

Per confrontare soggetti di taglia differente, inoltre, è necessario normalizzare il CE per una dimensione corporea (peso corporeo o meno frequentemente superficie corporea).

Ne consegue che il CE potrà essere espresso in:

- **$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$**
- **$\text{ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$**

Quindi:

il CE per una data forma di attività fisica o di locomozione umana è dato dal RAPPORTO tra DISPENDIO ENERGETICO per UNITA' di TEMPO (POTENZA METABOLICA) e la VELOCITA'.

$$\begin{array}{c}
 \text{litri O}_2 \cdot \text{min}^{-1} \\
 \text{oppure} \\
 \text{ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \\
 \nearrow \\
 \dot{E} \\
 \text{CE} = \frac{\dot{E}}{v} \\
 \searrow \\
 \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} \\
 \text{oppure} \\
 \text{Km} \cdot \text{h}^{-1} \\
 \text{oppure} \\
 \text{Km} \cdot \text{min}^{-1}
 \end{array}$$

$\text{ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$
 oppure
 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$

dove:

\dot{E} = **POTENZA METABOLICA:** dispendio energetico per unità di tempo ($V'O_2/\text{min}$)^{*}

v = **VELOCITA':** m/sec, Km/h, km/min (1 m/sec = 3.6 Km/h)

* Il dispendio energetico per unità di tempo (= consumo di ossigeno/min = $V'O_2/\text{min}$) si misura con un metabolimetro

Trasponendo i termini dell'equazione:

$$v = \frac{\dot{E}}{CE}$$

Quest'equazione mette in evidenza come la massima velocità di ogni forma di locomozione è data dal rapporto tra la potenza metabolica massima del soggetto divisa per il CE della locomozione in questione. Il CE è a sua volta funzione della velocità.

CONDIZIONI NECESSARIE PER POTER MISURARE IL COSTO ENERGETICO

◇ **V'O₂ NETTO**

Per misurare il CE di un determinato esercizio, attività fisica o forma di locomozione umana, è necessario in primo luogo tenere in considerazione che esiste una differenza tra **SPESA ENERGETICA TOTALE (V'O₂ totale)** e **SPESA ENERGETICA NETTA (V'O₂ netto)**. La SPESA ENERGETICA TOTALE (V'O₂ totale) corrisponde alla potenza metabolica registrata durante la valutazione dell'attività fisica in esame; la SPESA ENERGETICA NETTA (V'O₂ netto) rappresenta il valore della SPESA ENERGETICA TOTALE alla quale viene sottratto il la POTENZA METABOLICA in condizioni di RIPOSO (V'O₂ basale).

$$V'O_2 \text{ netto} = V'O_2 \text{ totale} - V'O_2 \text{ basale}$$

◇ **INTENSITA' DELL'ESERCIZIO.**

In secondo luogo devo considerare l'INTENSITA' alla quale deve essere svolta la prova.

Il presupposto per la misurazione del CE è che il soggetto che sta effettuando l'esercizio stia utilizzando esclusivamente energia ad origine aerobica e si trovi in una condizione di equilibrio tra dispendio e richiesta di energia. Ciò è possibile quando l'intensità dell'esercizio è inferiore all'intensità della soglia anaerobica.

In realtà, sarebbe possibile misurare il CE anche ad intensità di lavoro superiori all'intensità corrispondente alla soglia anaerobica. In questo caso, le richieste energetiche dell'esercizio superano le possibilità di sostentamento energetico ad origine esclusivamente aerobica e si rende indispensabile l'intervento di meccanismi energetici anaerobici. In questa condizione, il dispendio energetico dell'esercizio è rappresentato dalla somma della componente ad origine aerobica (rappresentata dal V'O₂) alla componente ad origine anaerobica lattacida (rappresentata dal lattato). Il contributo energetico fornito dal metabolismo aerobico lattacido non è facilmente quantificabile. Presuppone la determinazione della lattatemia in condizioni basali (poco prima dell'inizio della prova: lattato basale) e al termine della prova (lattato di picco) e la conversione delle mM di lattato accumulato (lattato di picco - lattato basale) in equivalenti di consumo di ossigeno (1 mM di lattato accumulato corrisponde all'energia prodotta da 3 mlO₂ · kg⁻¹; Di Prampero, 1991).

◇ **DURATA DELL'ESERCIZIO**

In fine, deve essere considerata la durata della prova. Requisito necessario per la misurazione del CE è la stabilità nel tempo della richiesta energetica e di conseguenza del dispendio energetico (V'O₂ stazionario). Affinché ciò possa avvenire, il carico di lavoro deve essere costante (esercizio "rettangolare" o "a onda quadra") e di durata non inferiore a 6 minuti.

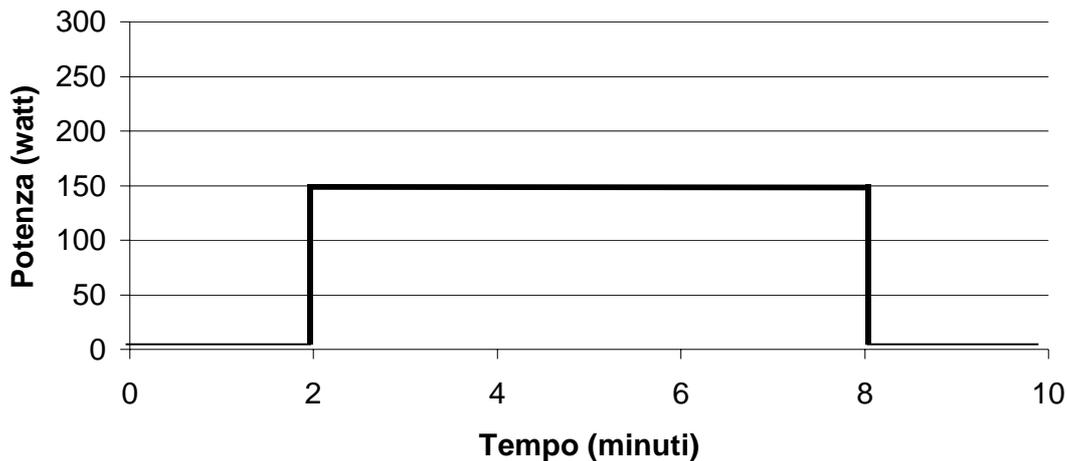
PROTOCOLLI PER LA MISURAZIONE DEL COSTO ENERGETICO

Considerati i requisiti necessari per una corretta misurazione del CE, sarà possibile scegliere tra i seguenti protocolli di esercizio:

1) TEST "RETTANGOLARE" o "A ONDA QUADRA"

Il soggetto deve effettuare un unico carico di lavoro di intensità costante e per una durata non inferiore a 6 minuti.

Protocollo test "rettangolare" o "a onda quadra"

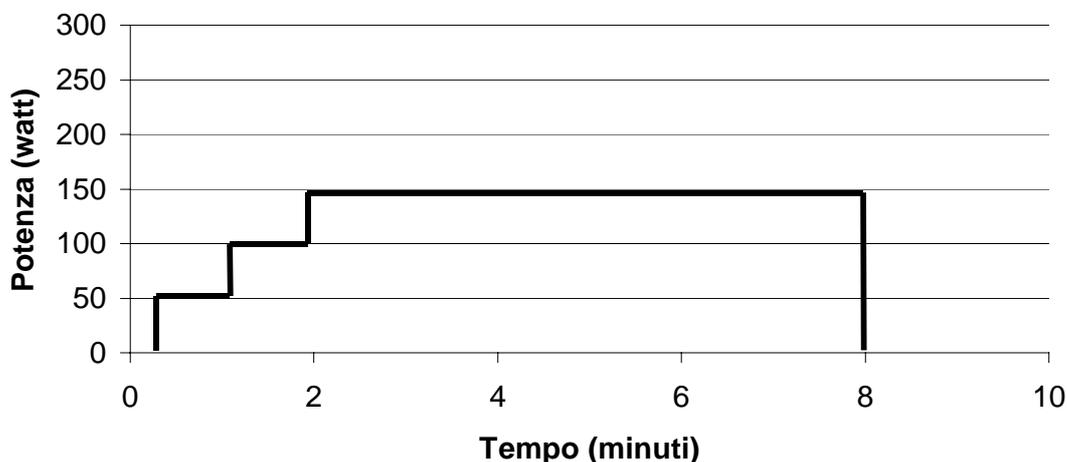


La scelta del carico può essere fatta sulla base di un test precedente, di un test incrementale con carichi crescenti eseguiti per la misurazione della massima potenza aerobica (massima potenza aerobica = $\dot{V}O_2$; al fine di stabilire la percentuale di $\dot{V}O_2$ max alla quale eseguire il test per la misurazione del CE) o, in fine, sulla base delle caratteristiche di gara e dell'atleta in modo da testare la velocità specifica più interessante.

2) TEST "TRAPEZOIDALE"

Il soggetto viene sottoposto a carichi di lavoro crescenti; una volta raggiunta la potenza meccanica richiesta, il carico di lavoro viene mantenuto costante per almeno 6 minuti

Protocollo test "trapezoidale"



FASI TRANSIENTI E DEBITO DI OSSIGENO

All'inizio di un esercizio aerobico (fig 3.15, da "Fisiologia dell'esercizio", P. Cerretelli, pag 74) , di intensità moderata (curva A) e costante nel tempo (protocollo "a onda quadra"), la curva che descrive il consumo di ossigeno in funzione del tempo è ritardata rispetto al tracciato della potenza meccanica (il cui adeguamento avviene in modo istantaneo). Nei primi 2-3 minuti di esercizio, il consumo di ossigeno (cioè la via energetica aerobica) è insufficiente alla resintesi di tutto l'ATP necessario all'attività muscolare.

All'inizio del lavoro, infatti, una parte dell'ATP necessario viene resintetizzata da fonti energetiche differenti da quella aerobica (**fase di contrazione del DEBITO DI OSSIGENO**). Il DEBITO di OSSIGENO contratto rappresenta pertanto la differenza tra il volume di O₂ consumato all'inizio del lavoro e il volume di O₂ che verrebbe effettivamente consumato in un tempo uguale ma allo stato stazionario. Le fonti energetiche che stanno alla base della contrazione del debito di ossigeno sono l'idrolisi della fosfocreatina (PCr) ed eventualmente la produzione precoce di acido lattico.

All'inizio del lavoro, la concentrazione di PCr muscolare diminuisce fino a raggiungere un livello costante in circa 3 minuti. Tale livello sarà tanto più basso quanto maggiore sarà il valore di $\dot{V}O_2$ allo stato stazionario.

Qualora l'intensità del lavoro dovesse essere superiore al 65-70% della massima potenza aerobica ($\dot{V}O_2 \text{ max}$), si potrà osservare all'inizio dell'esercizio una moderata produzione di acido lattico (lattato precoce), che a sua volta contribuisce alle necessità energetiche del muscolo.

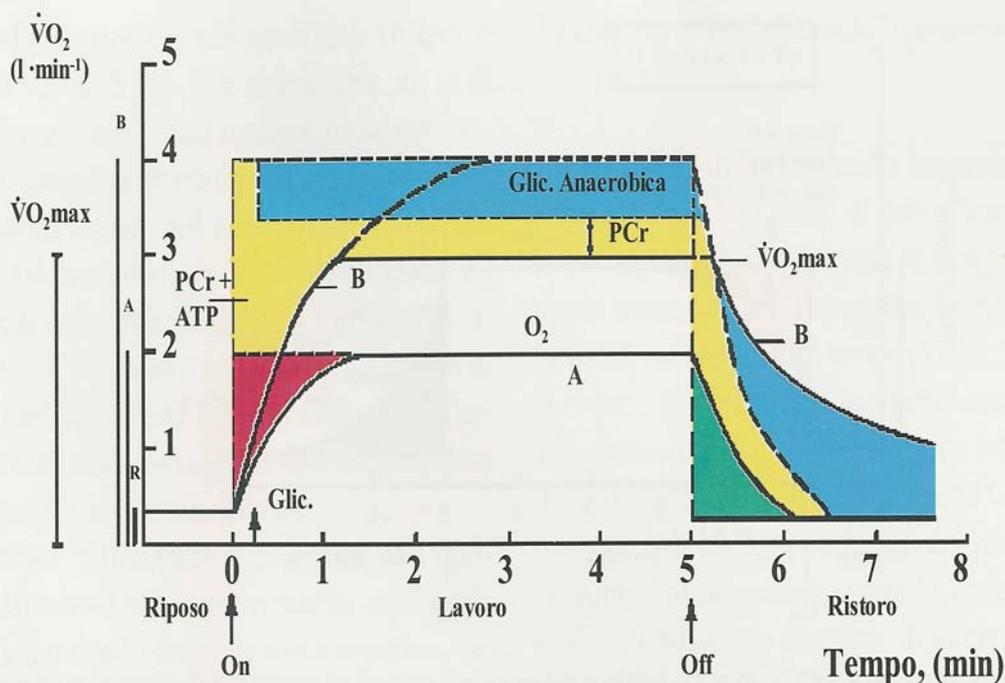


Fig. 3.15 - $\dot{V}O_2$ in funzione del tempo nel corso di un esercizio submassimale (curva A) e di un esercizio sopramassimale (curva B). Si può rilevare che, in seguito all'esercizio di intensità A, il soggetto contrae e paga un debito alattacido di entità approssimativamente identica. La cinetica di contrazione e di pagamento di tale debito è rapida ($t_{1/2} \cong 30 \text{ sec}$). Nel corso dell'esercizio B, il soggetto deve resintetizzare l'ATP ad un tasso superiore a quello reso possibile dal massimo apporto energetico ossidativo ($\dot{V}O_2 \text{ max}$). Deve fare pertanto anche ricorso : 1) alla glicolisi anaerobica che interviene precocemente (freccia Glic) e che, nel caso specifico, rende conto di una notevole frazione dell'ATP resintetizzato (v. altezza del rettangolo azzurro "Glic. anaerobica"), e 2) ad un'ulteriore deplezione delle riserve di PCr. Durante il ristoro la curva B, che descrive $\dot{V}O_2$ totale, può essere scomposta in varie componenti di cui una, quella corrispondente al pagamento della frazione alattacida del debito, è tracciata in tratteggio. (schematica)

Alla fine dell'esercizio il consumo di O₂ ritorna ai valori di riposo (**fase di PAGAMENTO DEL DEBITO DI OSSIGENO**) secondo una funzione complessa nella quale è possibile identificare almeno 3 componenti:

- 1) una componente rapida (40-60'') che corrisponde alla resintesi della PCr idrolizzata all'inizio dell'esercizio
- 2) una componente lenta (15'-20') associata all'eliminazione dal sangue dell'acido lattico eventualmente accumulato
- 3) una fase molto lenta attribuita ad un incremento del metabolismo di riposo dovuto all'esercizio precedente

Se l'intensità dell'esercizio è moderata, il soggetto contrarrà e pagherà un debito di ossigeno esclusivamente "alattacido" in quanto non associato ad alcun accumulo significativo di acido lattico (Fig 3.15: l'area triangolare rossa all'inizio dell'esercizio è uguale all'area triangolare verde al termine dello stesso).

