

Energetica dell'esercizio muscolare

FGE aa.2015-16

Bilancio energetico

Grandezze del bilancio energetico

E = Energia (capacità di compiere lavoro)

h = calore disperso

w = lavoro meccanico (forza x spostamento)

R = riserve energetiche

substrati energetici

gradienti ionici

C = riserva di calore dell'organismo

Bilancio energetico

$$\dot{E} = \dot{h} + \dot{w} + \dot{R} + \dot{C}$$

Bilancio energetico

$$\dot{E} = \dot{h} + \dot{w} + \dot{R} + \dot{C}$$

Entrate

Alimenti

Uscite

Costruzione/mantenimento dell'organismo

Produzione/dispersione di calore

lavoro esterno

Calorimetria diretta

Principio

Stima del dispendio energetico
dal calore prodotto

Metodo

Camera calorimetrica

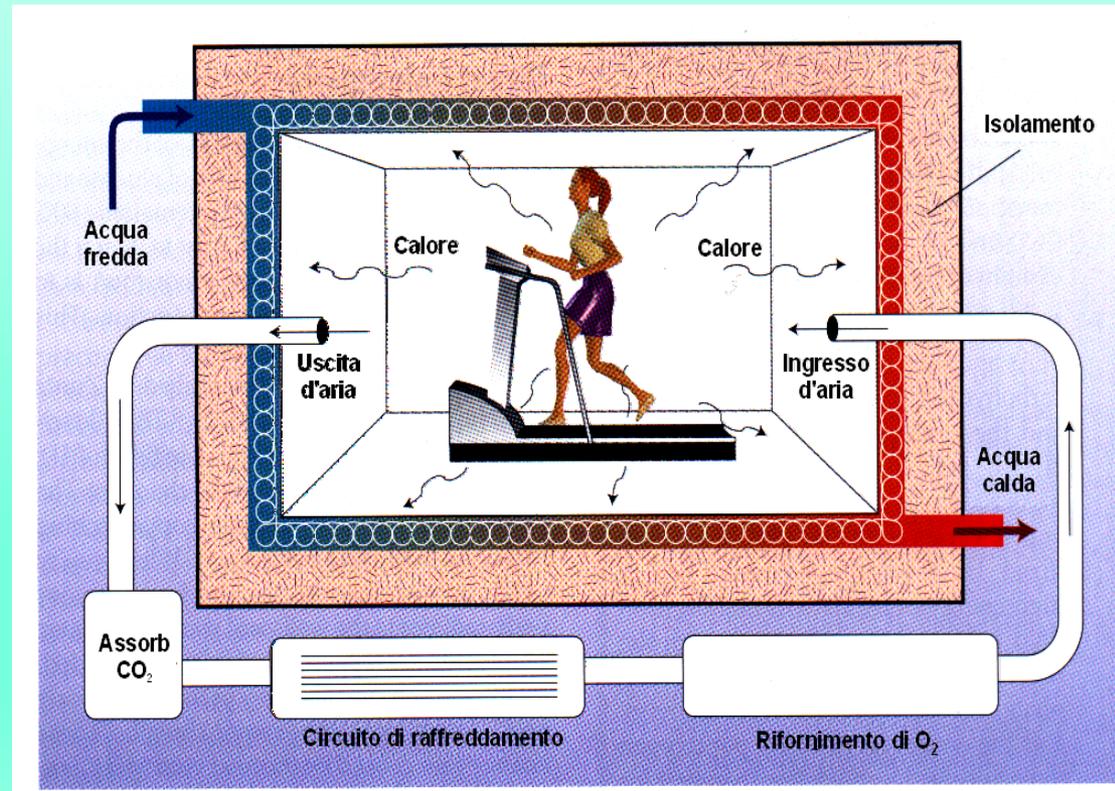
Vantaggi

misura diretta
precisione

Svantaggi

costo
lentezza della misura

Camera calorimetrica



Calorimetria indiretta

Principio

Calcolo dell'energia prodotta, dall'O₂ consumato per ossidare i substrati



$$Q = C \cdot V_{\text{O}_2}$$



$$dATP/dV'O_2$$

*n° di moli ricostituite per mole
di O₂ consumato varia tra*

5.6 e 6.2

Quoziente respiratorio **QR** $\equiv \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$

Ossidazione del glucosio ($C_6H_{12}O_6$)



$$QR = 6CO_2 / 6 O_2 = 1$$

Ossidazione degli acidi grassi (es. ac. palmitico $C_{16}H_{32}O_2$)



$$QR = 16 CO_2 / 23 O_2 = 0,70$$



QR ed equivalenti calorici

Equivalenza calorica del QR e % di kcal da carboidrati e grassi

QR	Energia	% kcal	
	kcal/l O ₂	Carboidrati	Grassi
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

limiti della calorimetria indiretta

Variabilità degli scambi di CO_2

Contributo delle proteine

CO_2 di origine non metabolica

Consumo energetico a riposo

Consumo di O₂ a riposo (adulto di 70 kg)

~ 0,3 l / min

~ 18 l / h

~ 432 l / giorno

QR medio a riposo = 0,80 = 4,80 kcal/l O₂

Spesa energetica giornaliera = 1 O₂ / giorno · kcal / l O₂
= 432 l O₂ · 4,80 kcal = 2.074 kcal/giorno

Metabolismo di attività = 1.800 - 3.000 kcal /giorno

Metabolismo basale

Condizioni

Al mattino, dopo almeno 8 ore di sonno

A digiuno da almeno 12 ore

Posizione supina

Temperatura ambiente 21°C

Rilassamento mentale

Valore standard = 1.200 - 2.400 kcal / giorno

Fattori da cui dipende

Massa magra

Superficie corporea

Età

Temperatura corporea

Stress

Ormoni



Spesa energetica per varie attività

Attività	Uomo 74 kg (kcal/min)	Donna 55 kg (kcal/min)	Riferito alla massa corporea (kcal/kg/min)
Sonno	1,2	0,9	0,017
Riposo seduti	1,7	1,3	0,024
Riposo in piedi	1,8	1,4	0,026
Ciclismo 11,3 km/h	5,0	3,9	0,071
Marcia 5,6 km/h	5,0	3,9	0,071
Tennis	7,1	5,5	0,101
Ciclismo 16,1 km/h	7,5	5,9	0,107
Sollevamento pesi	8,2	6,4	0,117
Pallacanestro	8,6	6,8	0,123
Pallamano	11,0	8,6	0,157
Wrestling	13,1	10,3	0,187
Corsa 12,1 km/h	14,0	11,0	0,200
Corsa 16,1 km/h	18,2	14,3	0,260
Nuoto (crawl) 4,8 km/h	20,0	15,7	0,285

Unità di misura del metabolismo

MET = Equivalente metabolico

1 MET = energia spesa a riposo in 1 minuto

$\dot{V}O_2$ a riposo = 3,5 ml/min/kg

Energia equivalente = 0,017 kcal/min/kg

1 MET = 3,5 ml O₂/min/kg

Fonti energetiche della contrazione

Gr I: sostanze utilizzate direttamente

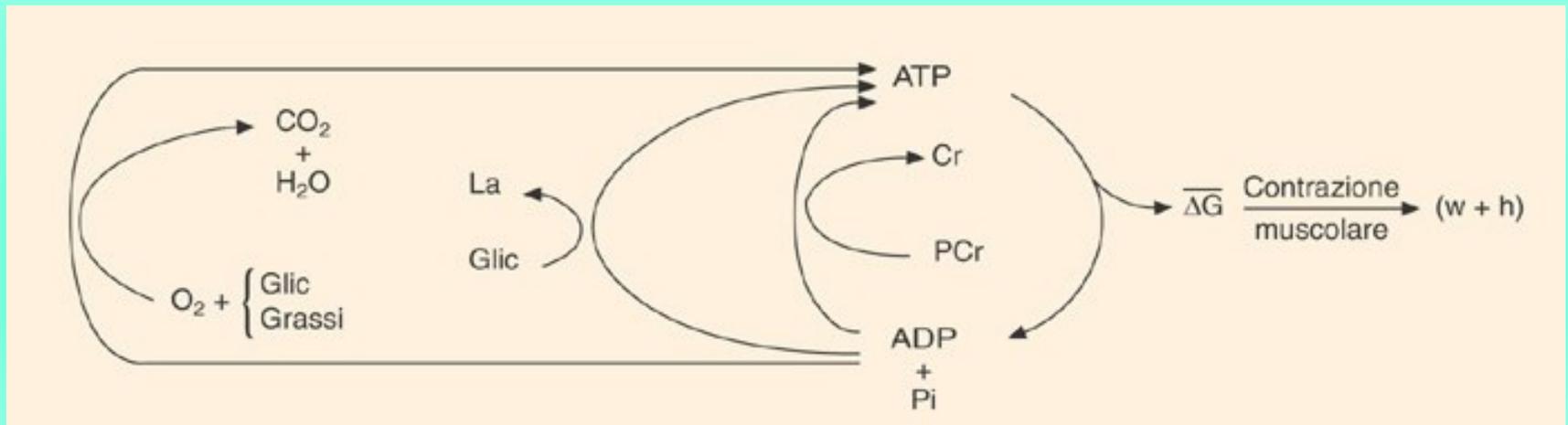
ATP – PCr

Gr II: sostanze utilizzate indirettamente senza O_2

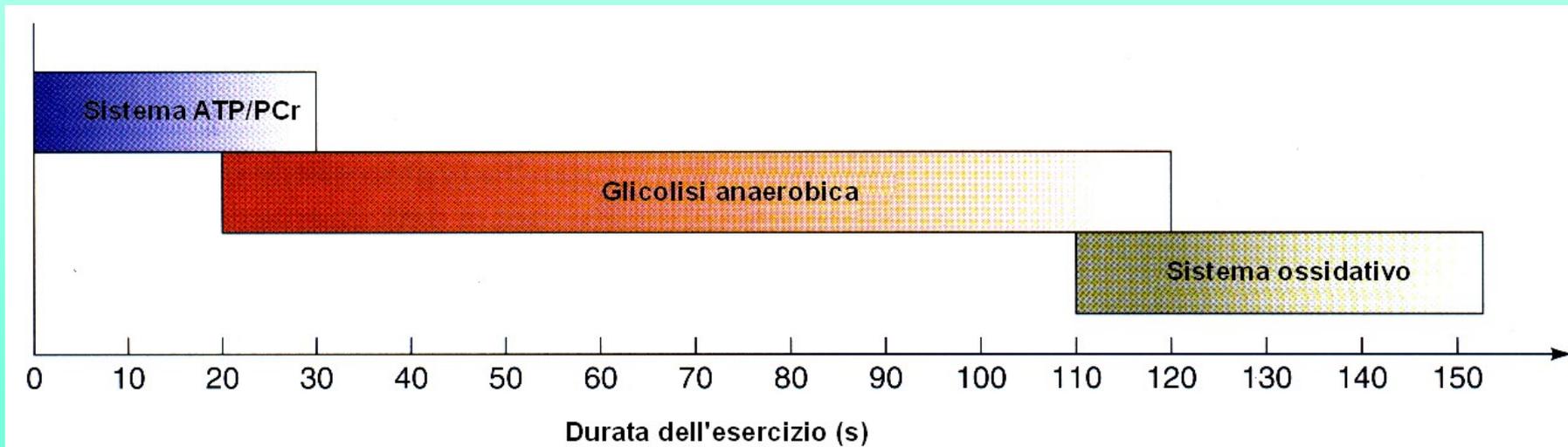
Glicogeno – Glucosio (scissione anaerobica)

Gr III: sostanze utilizzate indirettamente con consumo di O_2

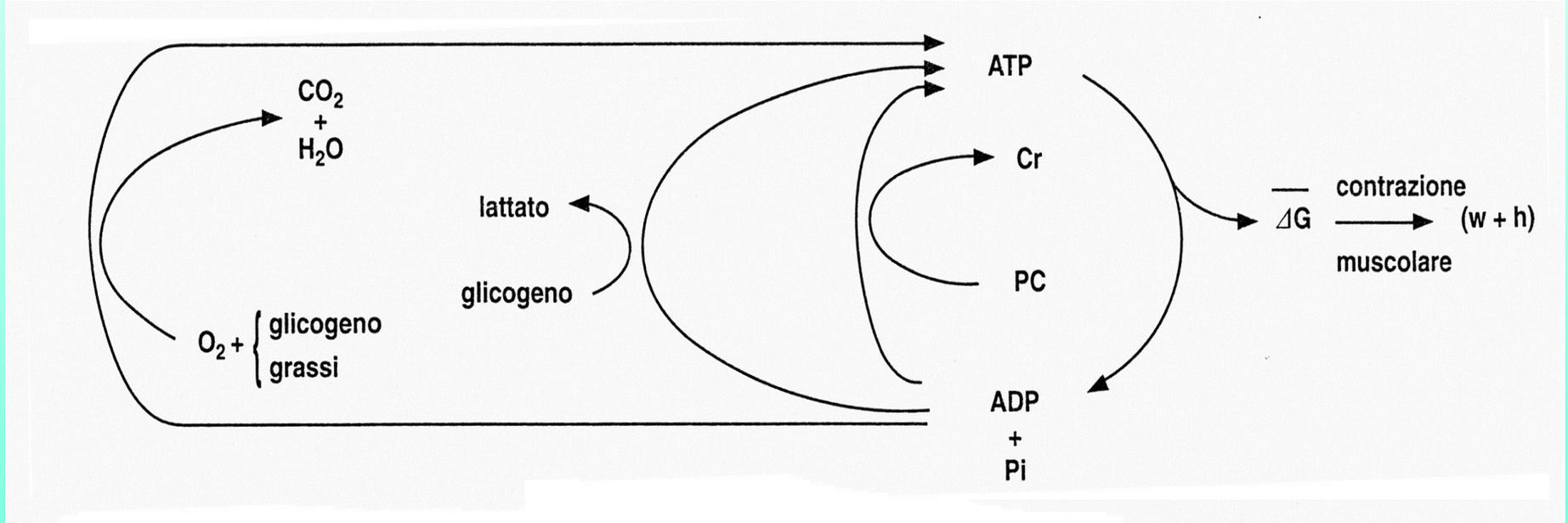
Glicogeno – Glucosio (ossidazione aerobica) – Ac. grassi - Proteine



Interazione dei sistemi energetici



Energetica dell'esercizio muscolare



$$E' \propto ATP' = ATP' = c V'O_2 + bLa' + PCr'$$

Lavoro e Potenza

$$W = F * l * \cos \alpha$$

Unità di misura:

Joule (J)= 1Newton*1metro

KJ o Kcal= 4.19 KJ

W= lavoro

F = forza

l = spostamento

a = angolo tra direzioni

$$\dot{W} = W \text{ (lavoro)} / t \text{ (tempo)}$$

Unità di misura:

Watt (W) = joule su secondo (J/s)

Kcal/min= 4.19 KJ/min= 70J/s=
70W

Rendimento (η):

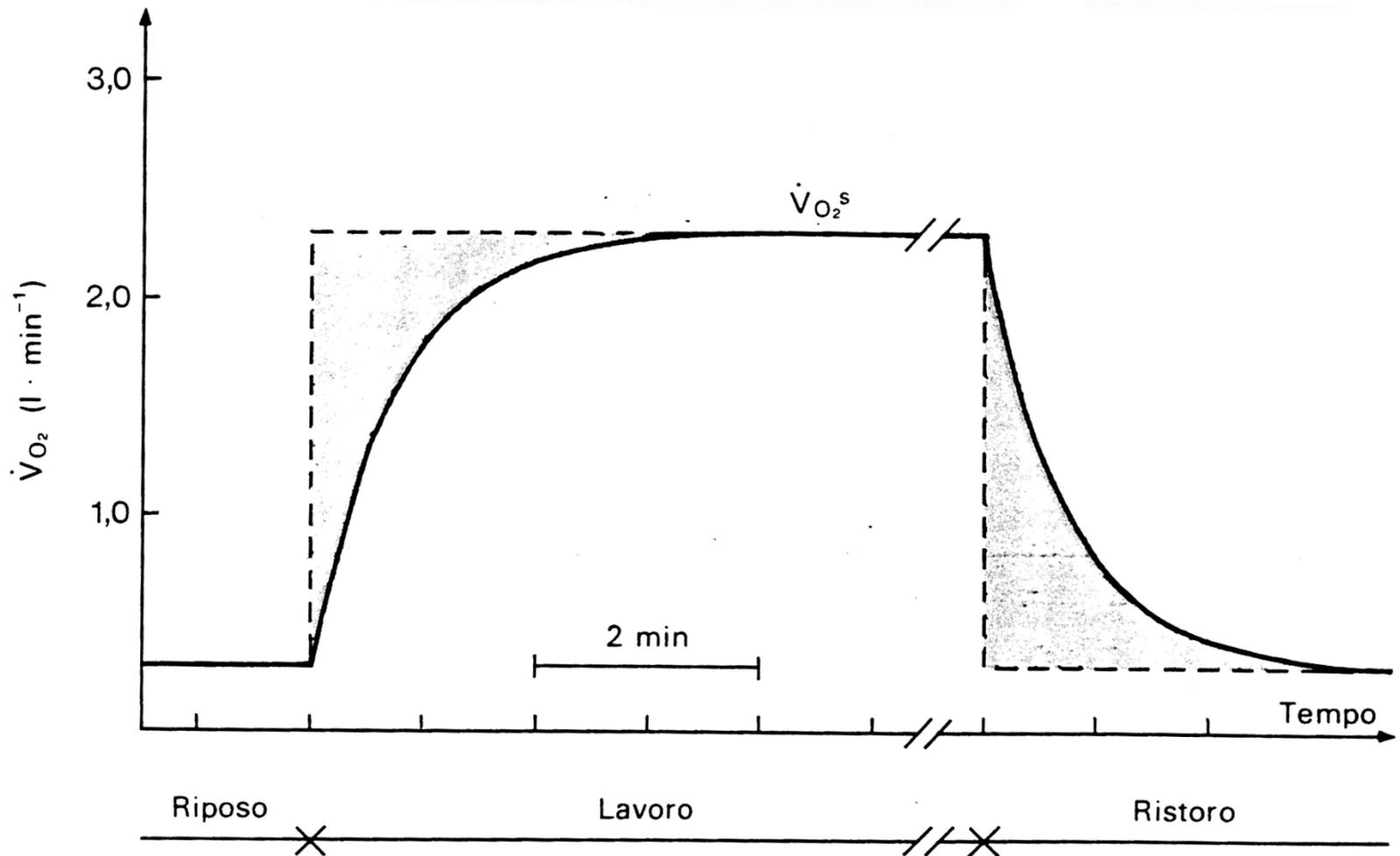
Lavoro (W)/Energia consumata (E)

(η)= 0 in contrazione isometrica

Unità di misura:

Numero puro (0-1) o (0-100%)

Il consumo di ossigeno allo stato stazionario



Metabolismo ossidativo

$$E' \propto \overset{\longrightarrow}{\text{ATP}'} = \overset{\longleftarrow}{\text{ATP}'} = c V'O_2$$

$$c = \sim P/O_2 = 6.17 \quad (4.13 + 2.07 \text{ QR})$$

$$1 \text{ mlO}_2 = 20.9 \text{ J}$$

Tabella 84.1 – Produzione di ATP per mole di substrato, o di O₂, consumato in diverse vie. È anche indicato il quoziente respiratorio, QR = $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$.

	reazione		ATP/mol		QR
			substrato	O ₂	
glicogene ^a	→	lattato	3	-	-
glucosio	→	lattato	2	-	-
lattato	→	CO ₂ + H ₂ O	17	5,7	1,00
glicogene ^a	→	CO ₂ + H ₂ O	37	6,2	1,00
glucosio	→	CO ₂ + H ₂ O	36	6,0	1,00
AGL ^b	→	CO ₂ + H ₂ O	138	5,6	0,71
acetoacetato	→	CO ₂ + H ₂ O	23	5,7	0,73
β-idrossibutirrato	→	CO ₂ + H ₂ O	26	5,8	0,80

a = per unità glucosidica

b = AGL, acidi grassi liberi, composizione simile al tessuto adiposo umano

Quoziente respiratorio

$$QR = \frac{VCO_2}{VO_2}$$

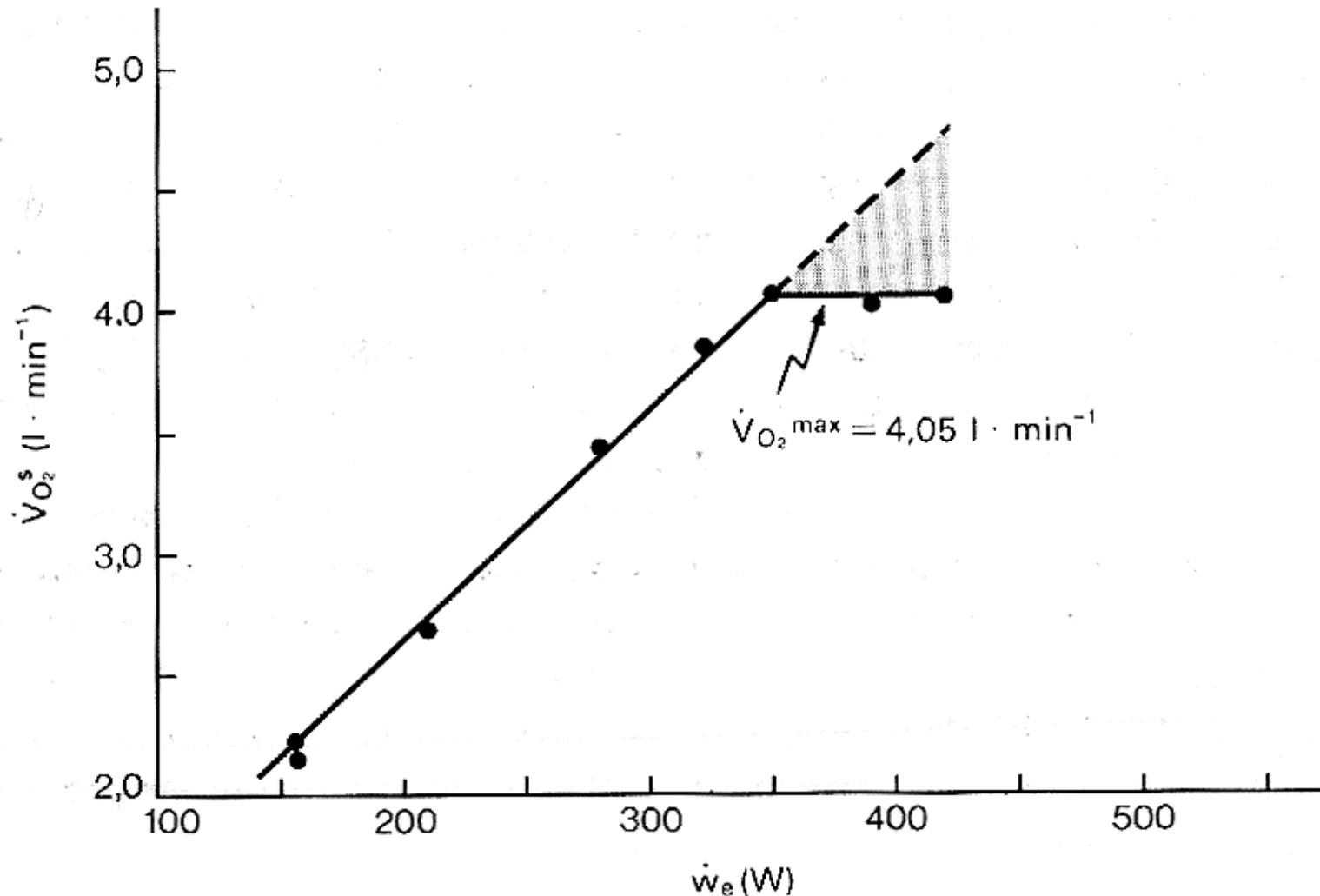
$$VCO_2 = 250 \text{ ml/min}$$

$$VO_2 = 300 \text{ ml/min}$$

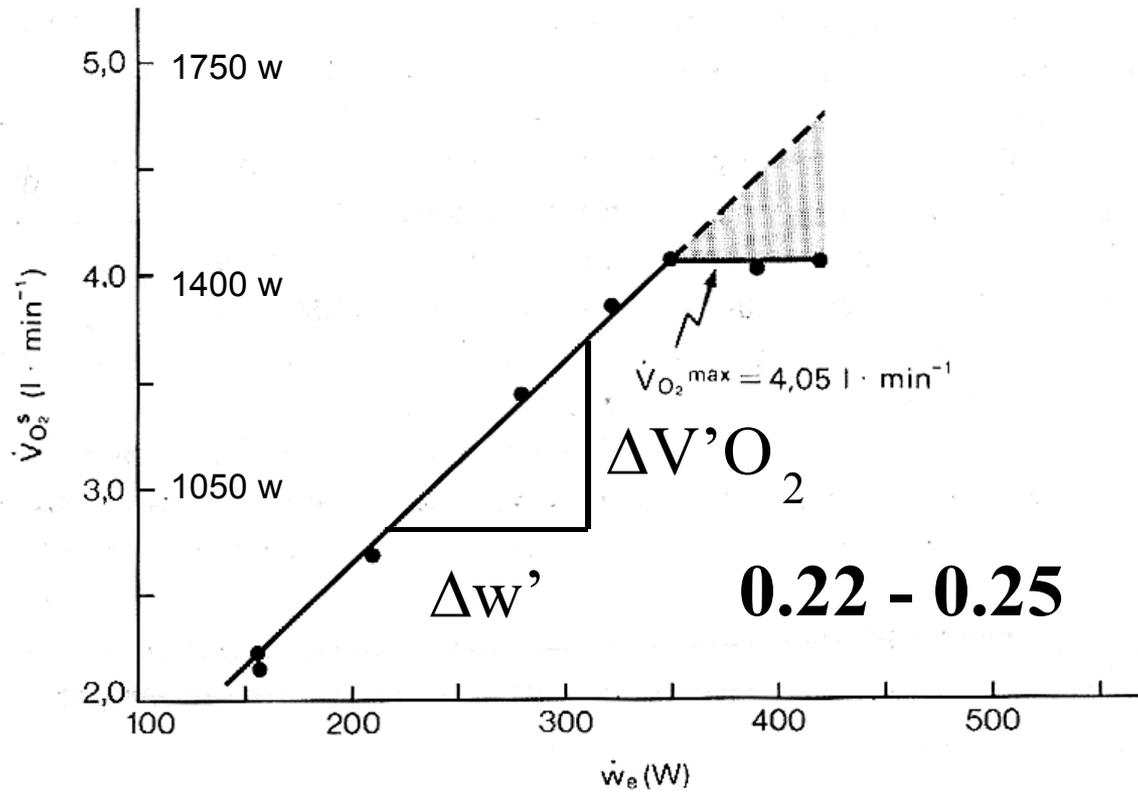
$$QR = 0.83$$

QR varia tra **0.67** (solo grassi)
e **1.00** (solo glucidi)

Relazione tra consumo di ossigeno e potenza meccanica



Rendimento meccanico



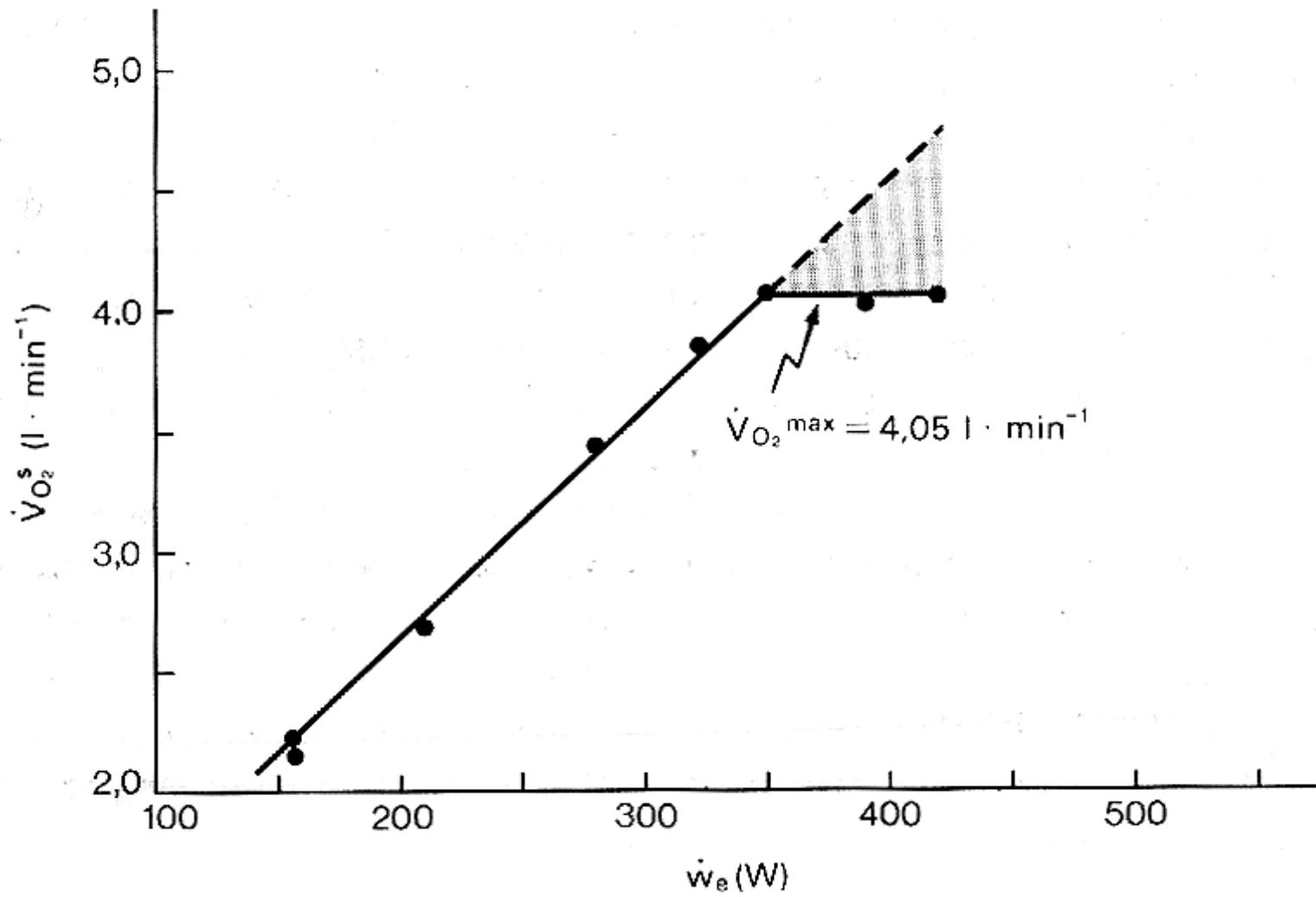
Rendimento

3 Calcolo del Rendimento Muscolare (es.o della cicloergometria)

- Rendimento *Lordo*: $w'/N'O_{2\text{totale}}$
- Rendimento *Netto*: $w'/N'O_{2\text{netto}}$
- *Delta* Rendimento : $\Delta w'/\Delta V'O_2$

(1 ml O_2 = 20.9 J)

Massimo consumo di ossigeno



Massimo consumo di ossigeno

$$E'_{\max} \xrightarrow{\quad} \text{ATP}'_{\max} \xleftarrow{\quad} = \text{ATP}'_{\max} = c V'O_{2\max}$$

- **Può essere espresso in valore assoluto o standardizzato per unità di massa corporea**
- **Determinazione**

Specificità dell'esercizio

Durata: 7 - 10/12 minuti

Tipo di test: onda quadra, incrementale, step

Massimo consumo di ossigeno

- **Criteri per il termine del test**

< 150 ml/min (Plateau)

Esaurimento

QR > 1.10

[La]_b > 10. mM

HR entro 10 bpm la massima teorica

Punteggio Scala di Borg (RPE) 19 -20

- **Riproducibilità ed accuratezza**

Errore percentuale totale: 5.6 %

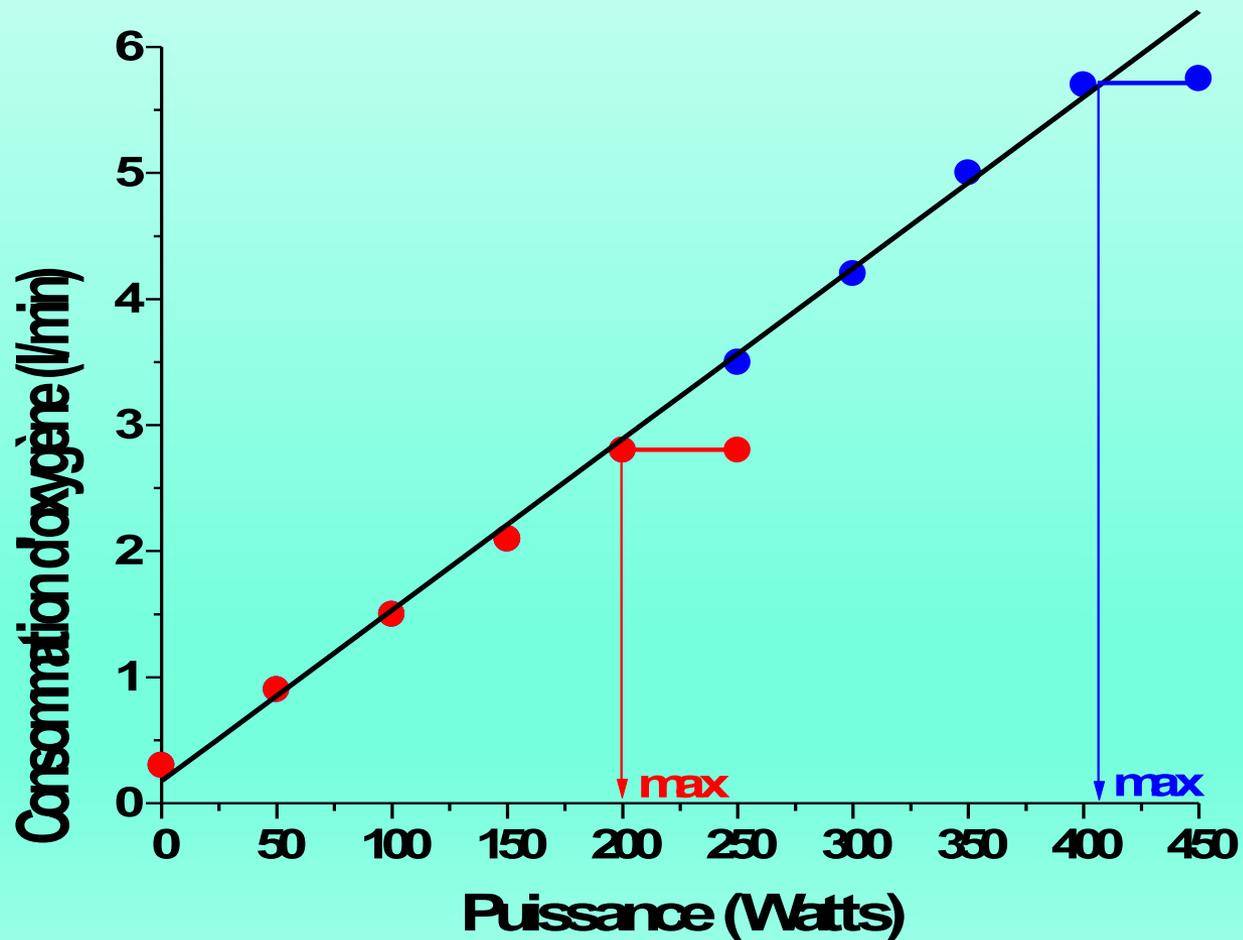
Errore metodologico: 10 % totale

Errore biologico: 90 % totale

Riproducibilità: 3 % (CV)

Variabilità giornaliera: 4-6 %

Massimo consumo di ossigeno



Massimo consumo di ossigeno

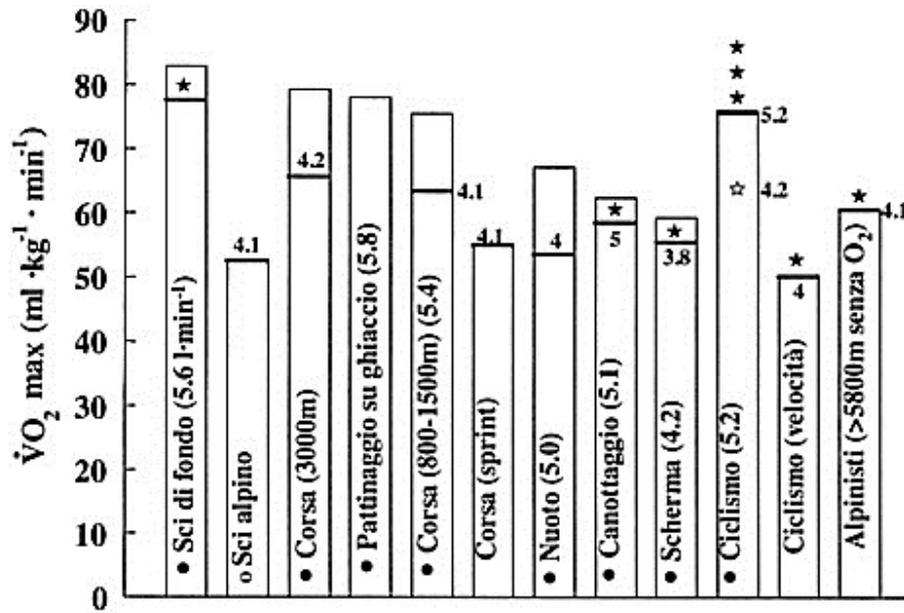


Fig. 3.37 – Massimo consumo di O₂ (ml · kg⁻¹ · min⁻¹ e l · min⁻¹) in diversi gruppi di atleti (da: Saltin e Åstrand, 1967, colonne marcate con ●). I segmenti più spessi a livello delle varie colonne indicano i valori medi riscontrati con metodo diretto nel nostro laboratorio di Milano. Le stelle si riferiscono a valori individuali di soggetti o gruppi, vincitori di Olimpiadi, di campionati del mondo o, limitatamente agli alpinisti, che hanno potuto superare gli 8500 metri di quota senza respiratore a O₂. La colonna marcata con o riporta i dati di Veicsteinas e Coll. (1984, comunicazione personale). La stella bianca si riferisce ad una donna.

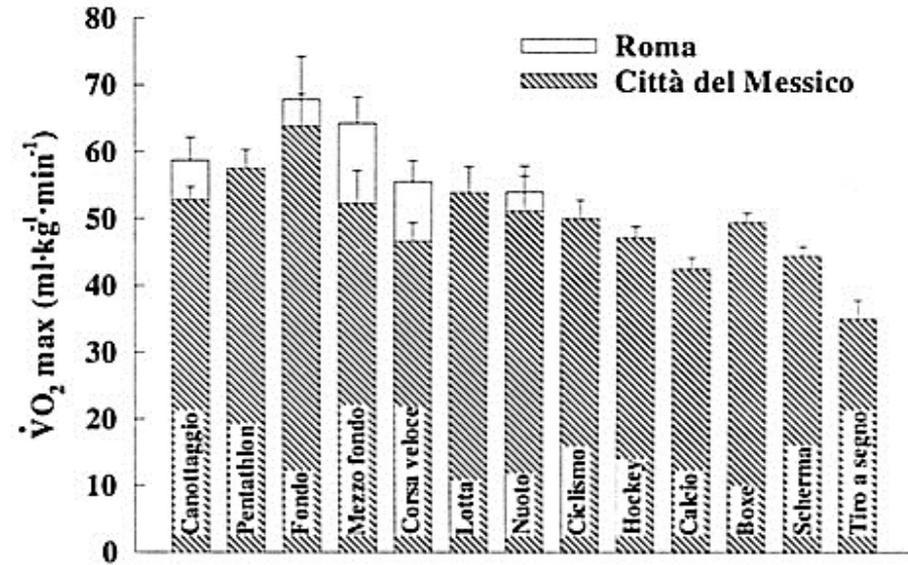
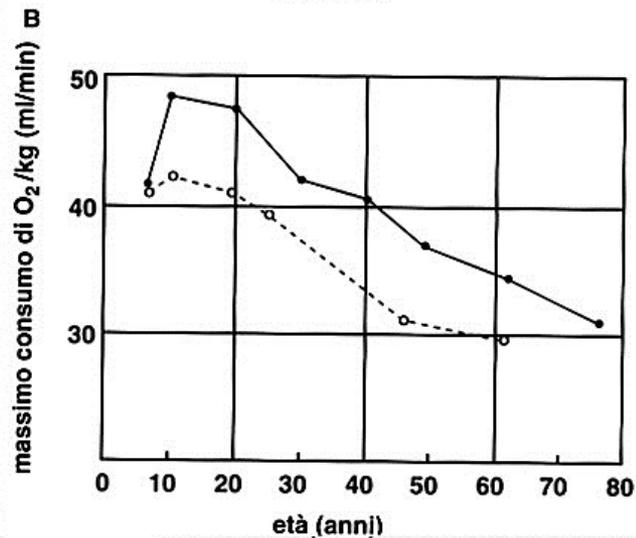
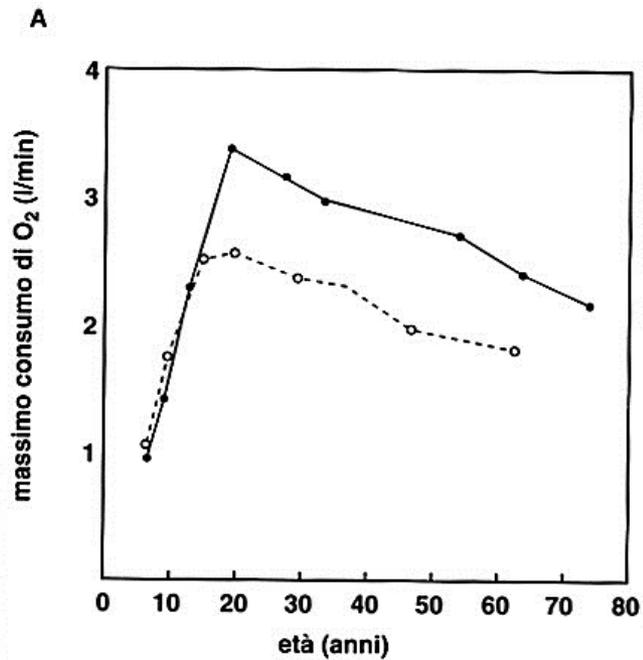


Fig. 3.38 – Massima potenza aerobica in un gruppo di atleti partecipanti alle Olimpiadi di Città del Messico (colonne tratteggiate) e alle Olimpiadi di Roma (colonne bianche). Si può osservare che i valori di VO₂ max registrati a 2250 m (Città del Messico) sono nettamente inferiori sia a quelli registrati in precedenza su atleti olimpionici a Roma sia ai valori medi attuali (v. Fig. 3.37). Si può rilevare inoltre che i dati di VO₂ max più recenti, a parità di specializzazione sportiva, sono sensibilmente più elevati di quelli registrati nel 1960.

Massimo consumo di ossigeno

La Massima Potenza Aerobica in Funzione dell'Età nei due sessi



Massimo consumo di ossigeno

- **$\text{VO}_{2\text{max}}$ può essere anche determinato indirettamente**
 - Approccio valido solo per studi epidemiologici
 - si basano sulla conoscenza del dispendio energetico di un esercizio standard (scalino, cicloergometro)
 - dipendono dalla massima frequenza cardiaca del soggetto) che è di solito calcolata a priori
 - errore 20 - 30 %

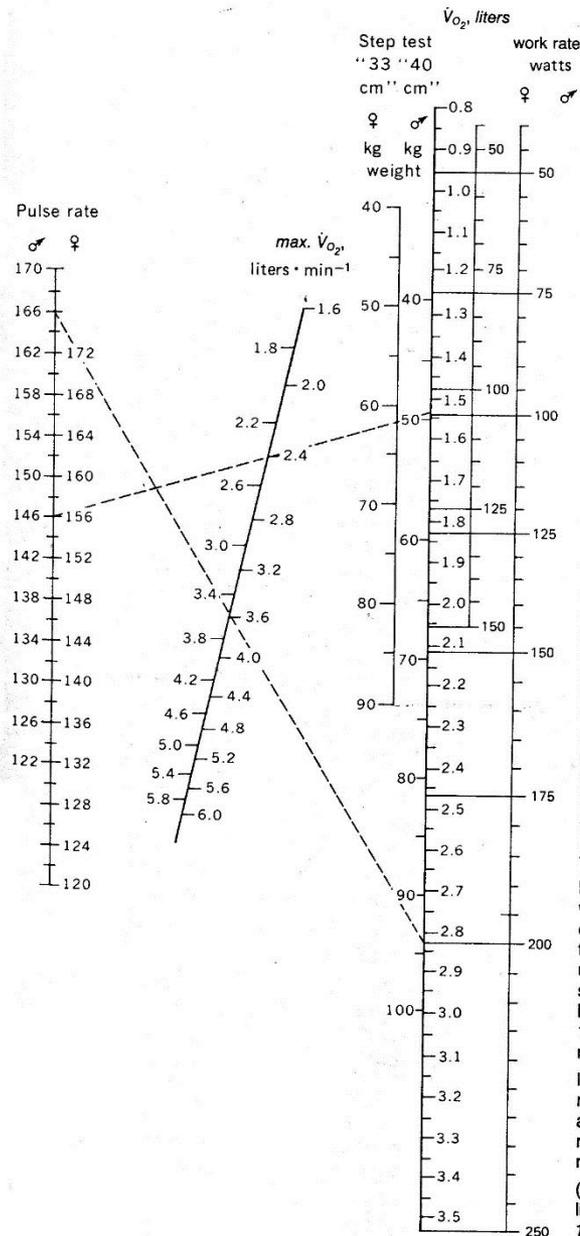


Figure 8-4
 The adjusted nomogram for calculation of maximal oxygen uptake from submaximal pulse rate and O₂-uptake values (cycling, running or walking, and step test). In tests without direct O₂-uptake measurement, it can be estimated by reading horizontally from the "body weight" scale (step test) or "work rate" scale (cycle test) to the "O₂ uptake" scale. The point on the O₂-uptake scale ($\dot{V}O_{2'}$, liters) shall be connected with the corresponding point on the pulse rate scale, and the predicted maximal O₂ uptake read on the middle scale. A female subject (61 kg) reaches a heart rate of 156 at step test; predicted max. $\dot{V}O_{2'} = 2.4$ liters · min⁻¹. A male subject reaches a heart rate of 166 at cycling test on a work rate of 200 watts; predicted max. $\dot{V}O_{2'} = 3.6$ liters · min⁻¹ (exemplified by dotted lines). (From I. Åstrand, 1960.)

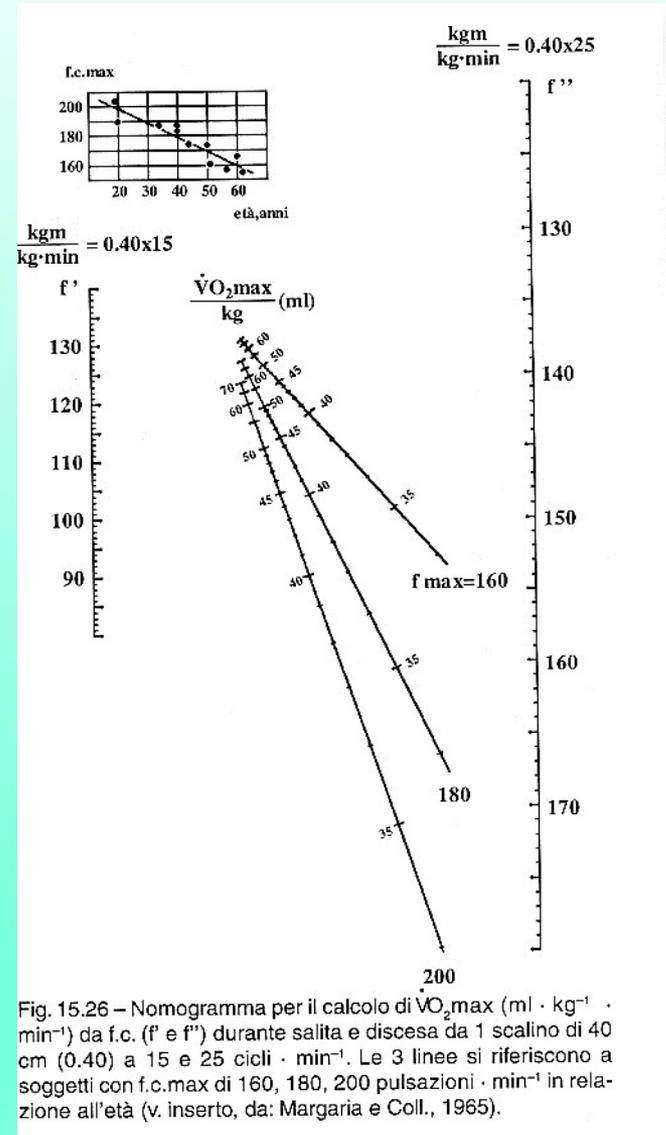
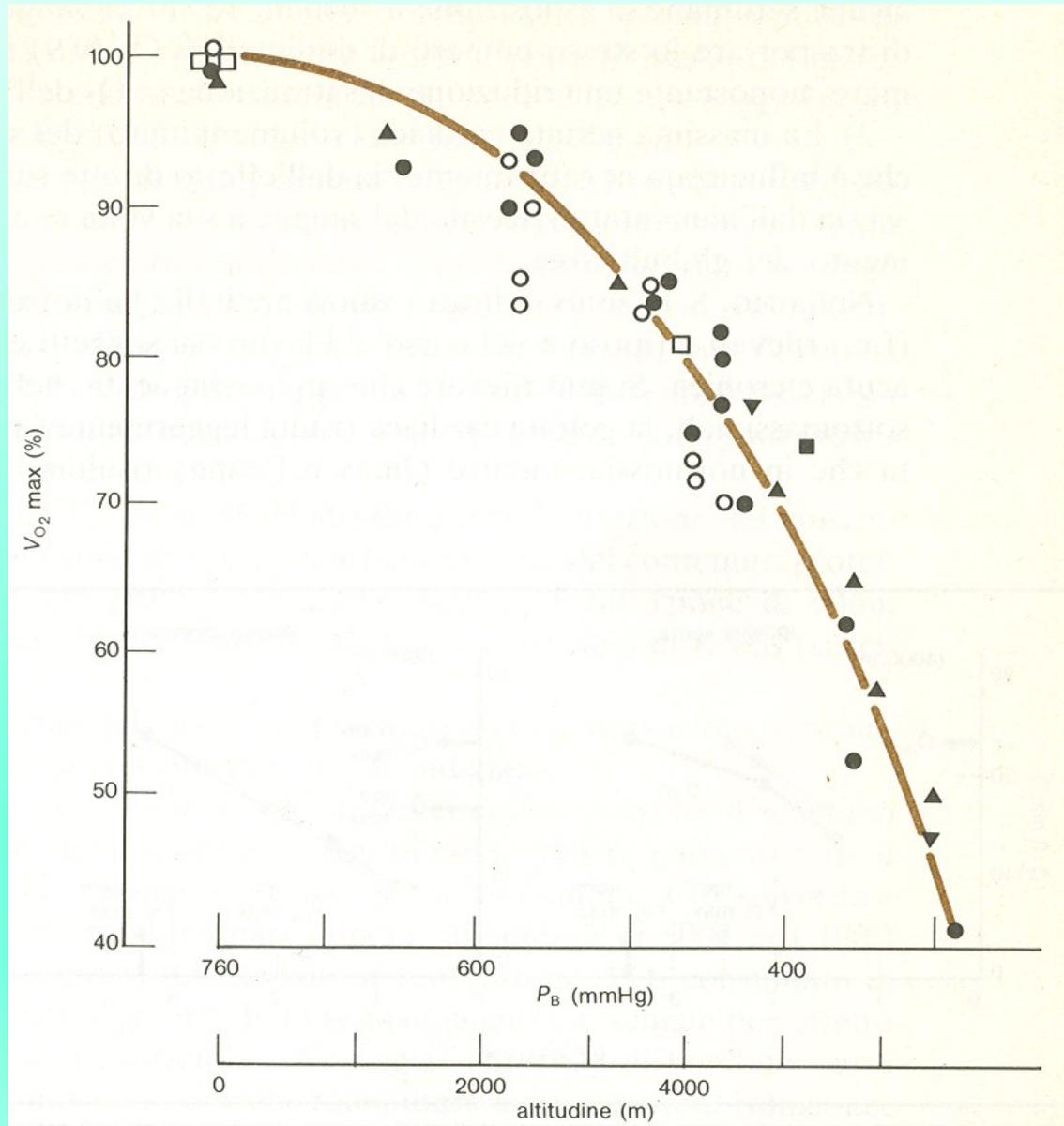
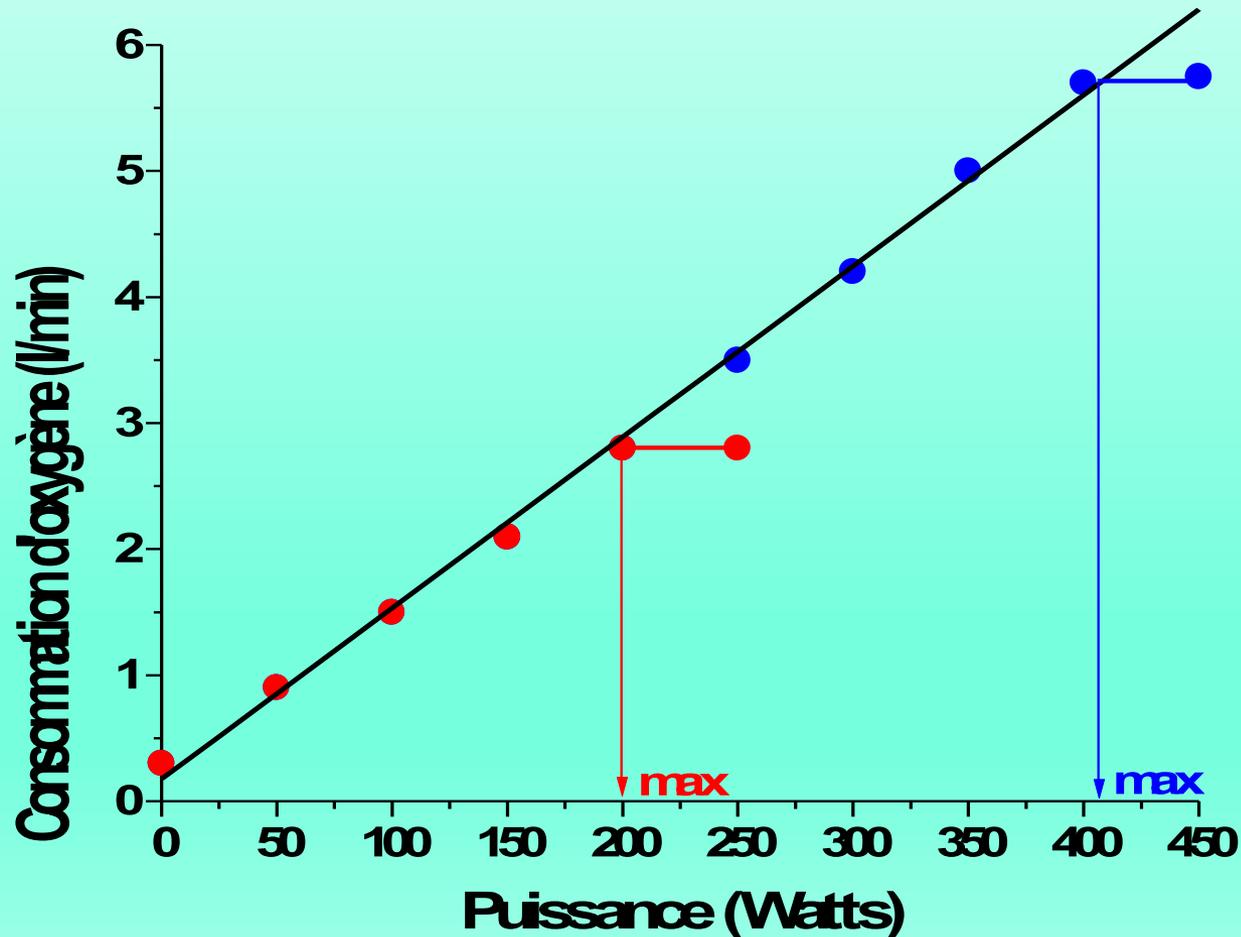


Fig. 15-26 – Nomogramma per il calcolo di $\dot{V}O_{2' \text{ max}}$ (ml · kg⁻¹ · min⁻¹) da f.c. (f' e f'') durante salita e discesa da 1 scalino di 40 cm (0.40) a 15 e 25 cicli · min⁻¹. Le 3 linee si riferiscono a soggetti con f.c.max di 160, 180, 200 pulsazioni · min⁻¹ in relazione all'età (v. inserto, da: Margaria e Coll., 1965).

Effetti dell'altitudine



Il massimo consumo di ossigeno è limitato

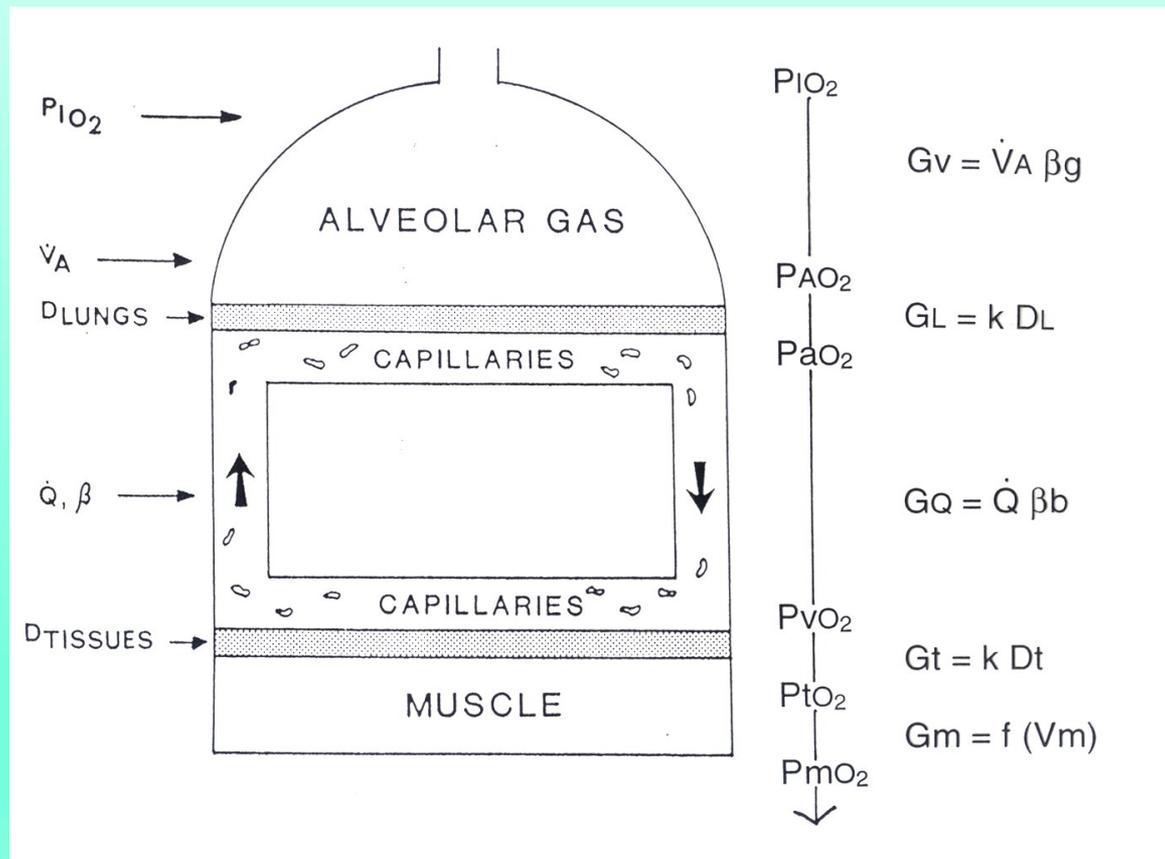


Il massimo consumo di ossigeno è limitato

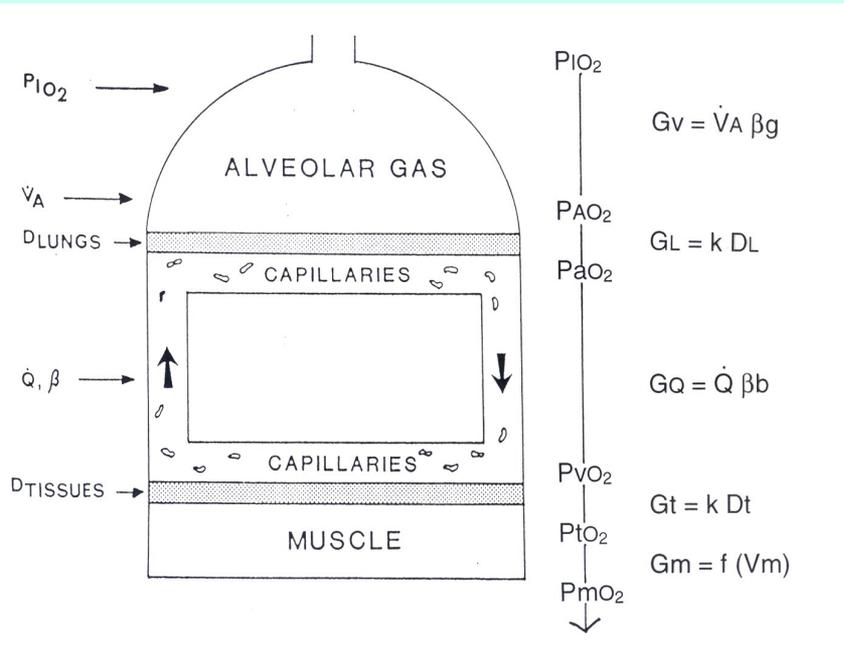
- Gli **atleti** hanno una massima gettata cardiaca molto alta, fino a **40 l/min** rispetto ai **20 l/min** dei **sedentari**
- **L'allenamento** aumenta il massimo consumo di ossigeno tanto quanto la massima gettata cardiaca
- **Il doping del sangue** aumenta il massimo consumo di ossigeno

Il massimo consumo di ossigeno è limitato principalmente dal **sistema cardiovascolare**

Cascata dell'ossigeno



In un sistema lineare, la frazione di limitazione al flusso imposta da ciascuna resistenza è uguale al rapporto tra la resistenza in questione e la resistenza totale



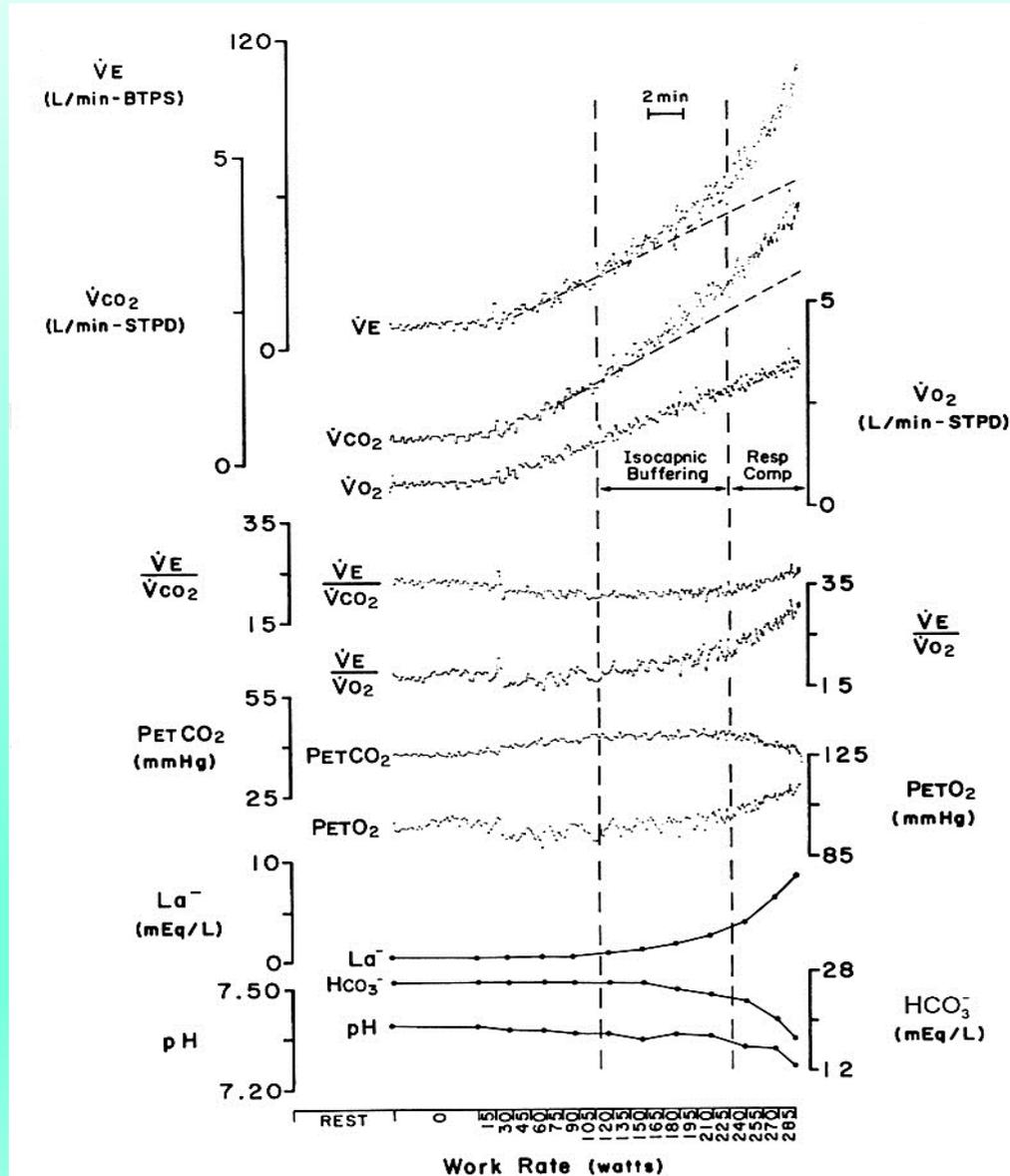
$$F_i = \frac{R_i}{R_T} = \frac{\Delta P_i}{\Delta P_T}$$

	Sea level sedentary	Sea level endurance athletes
$\dot{V}_{O_2 \max}$, L min ⁻¹	2.90	4.90
$P_{I_{O_2}}$, Torr	150	150
$P_{A_{O_2}}$, Torr	120	115 ^b
$P_{a_{O_2}}$, Torr	95	83 ^b
$P_{\bar{V}_{O_2}}$, Torr	20 ^a	18 ^b
$P_{m_{O_2}}$, Torr	0	0
Fv	0.20	0.23
FL	0.17	0.21
FQ	0.50	0.43
Fp	0.13	0.12

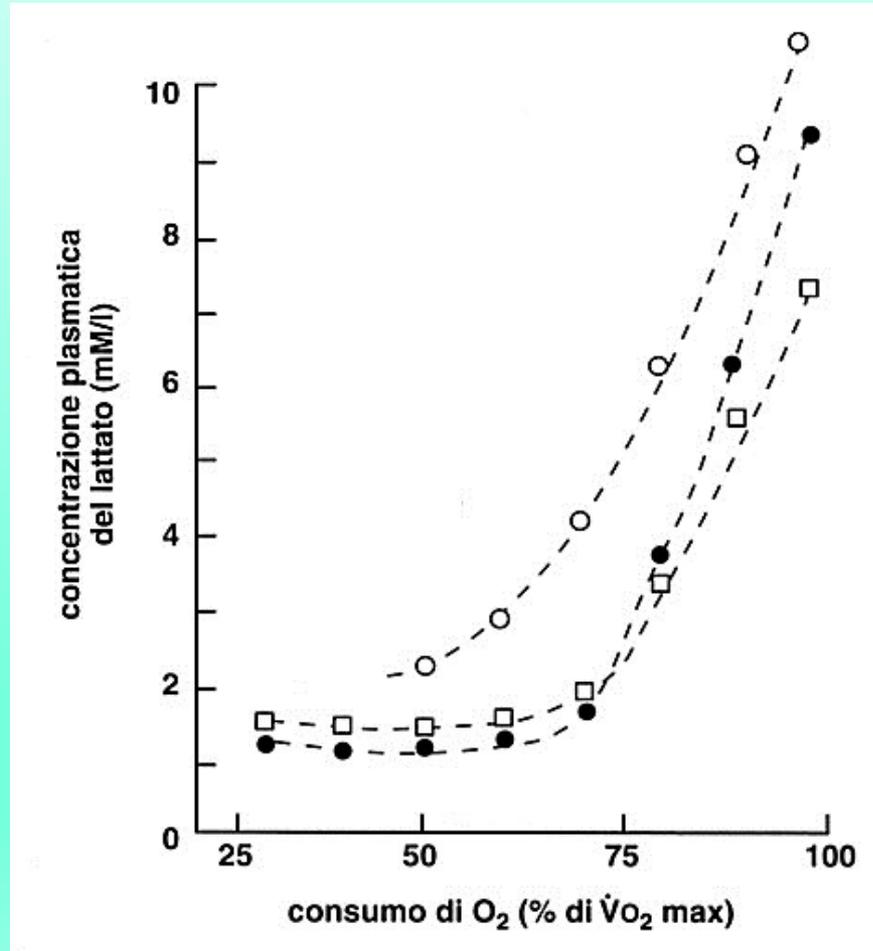
Experimental data at sea level are average values from Cerretelli and di Prampero (1987), except ^a (Turner et al., 1993) and ^b (Dempsey et al., 1984).

FQ = 0.70 ripetuto ad uno 0.50

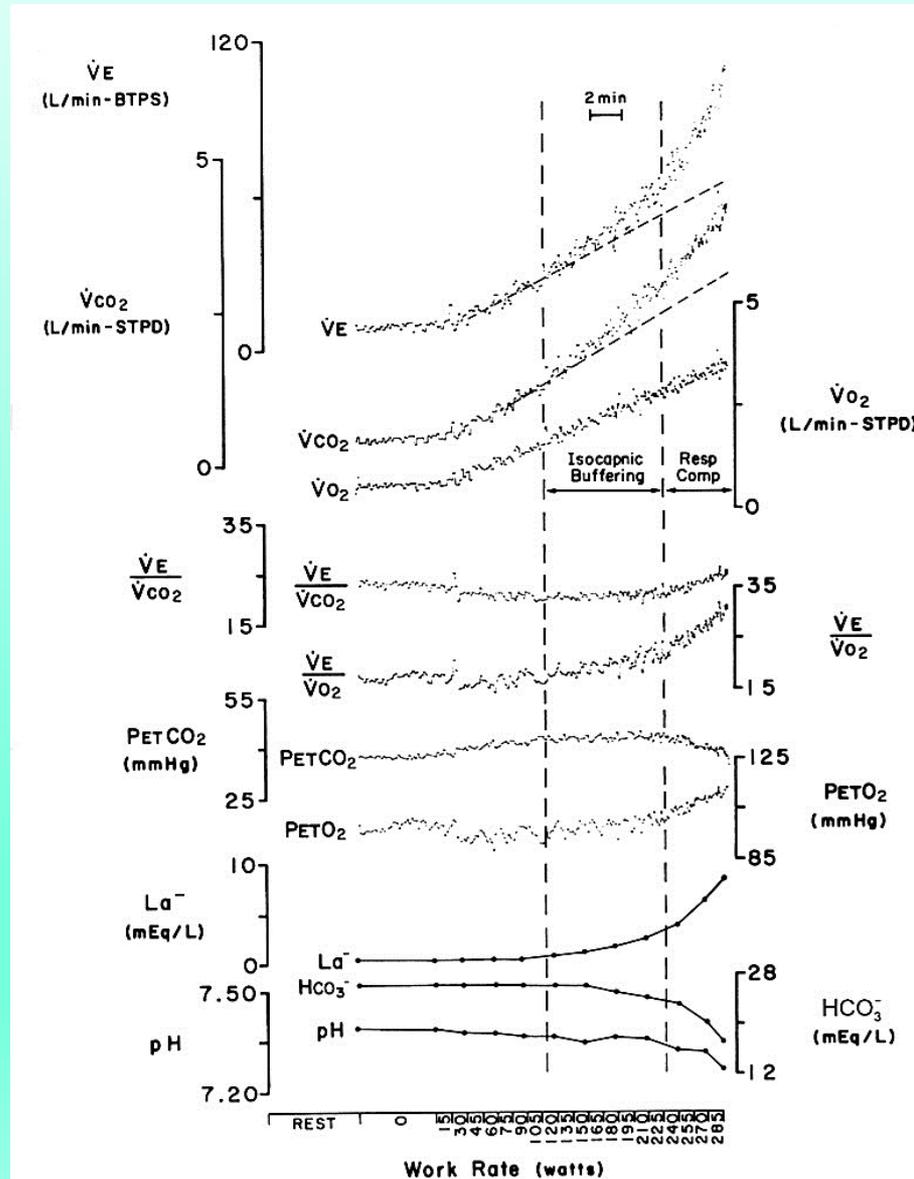
Respirazione a esercizio



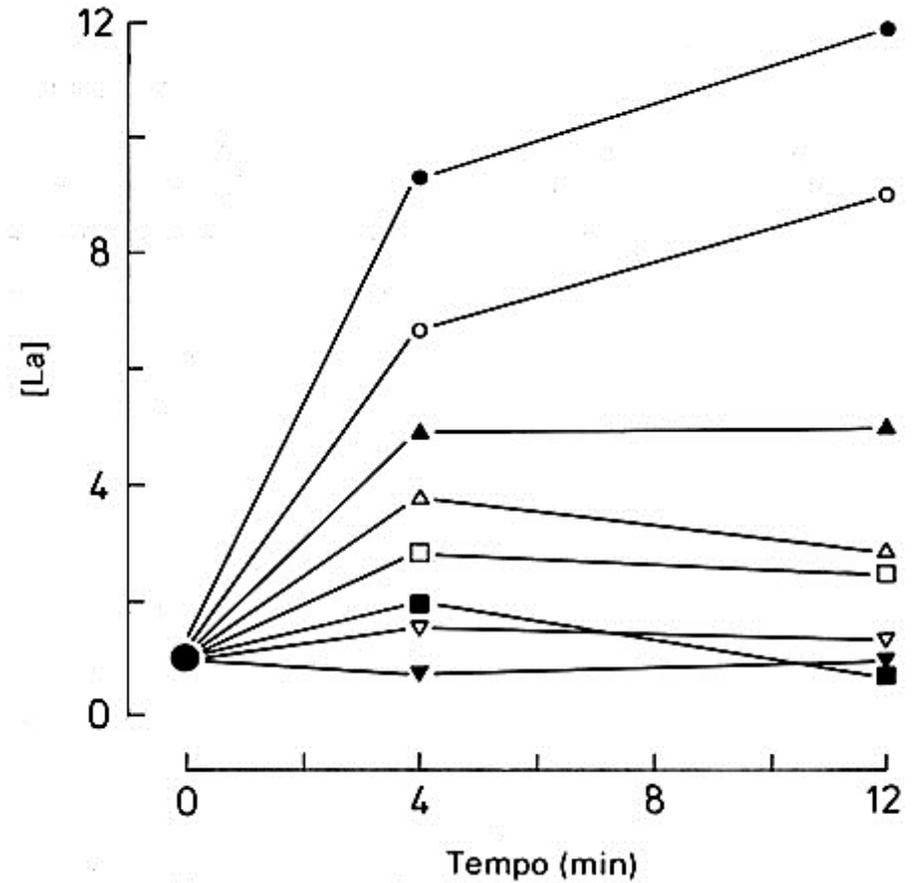
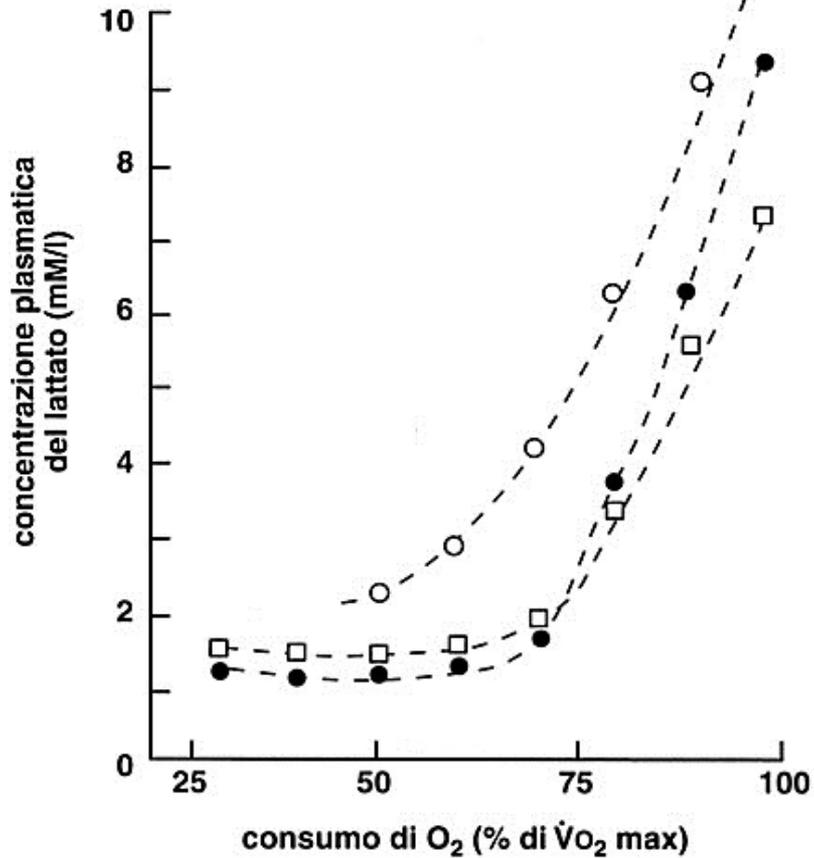
Soglia anaerobica



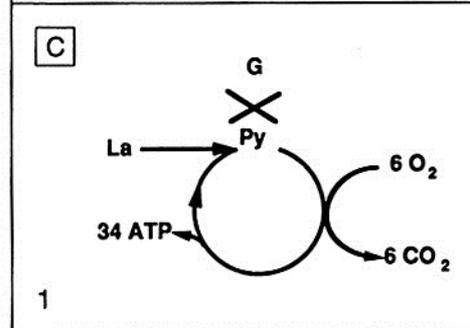
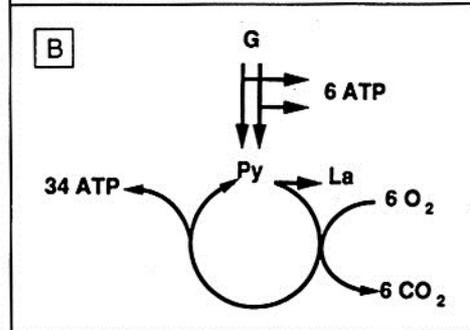
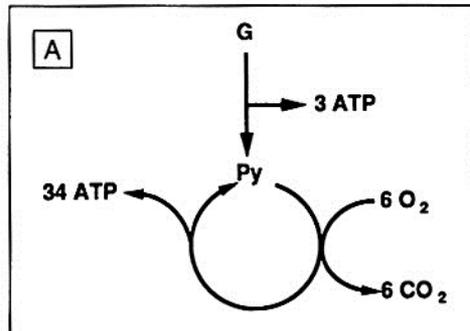
Soglia ventilatoria



Soglia? Anaerobica?



Come riesce il lattato a mantenere l'equilibrio?



Aerobica

$$\text{ATP/O}_2 = 6.17$$

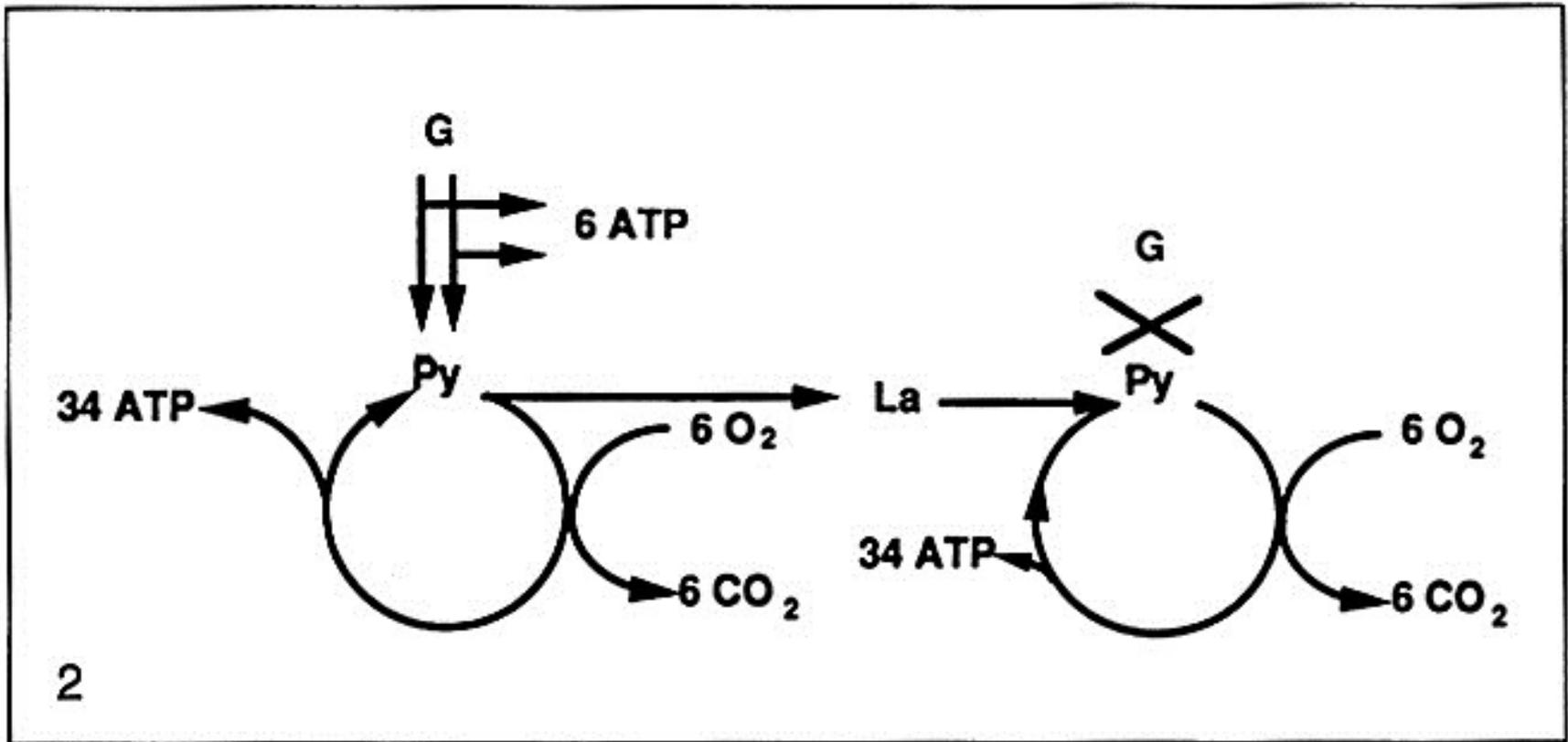
Ipoaerobica

$$\text{ATP/O}_2 = 6.67$$

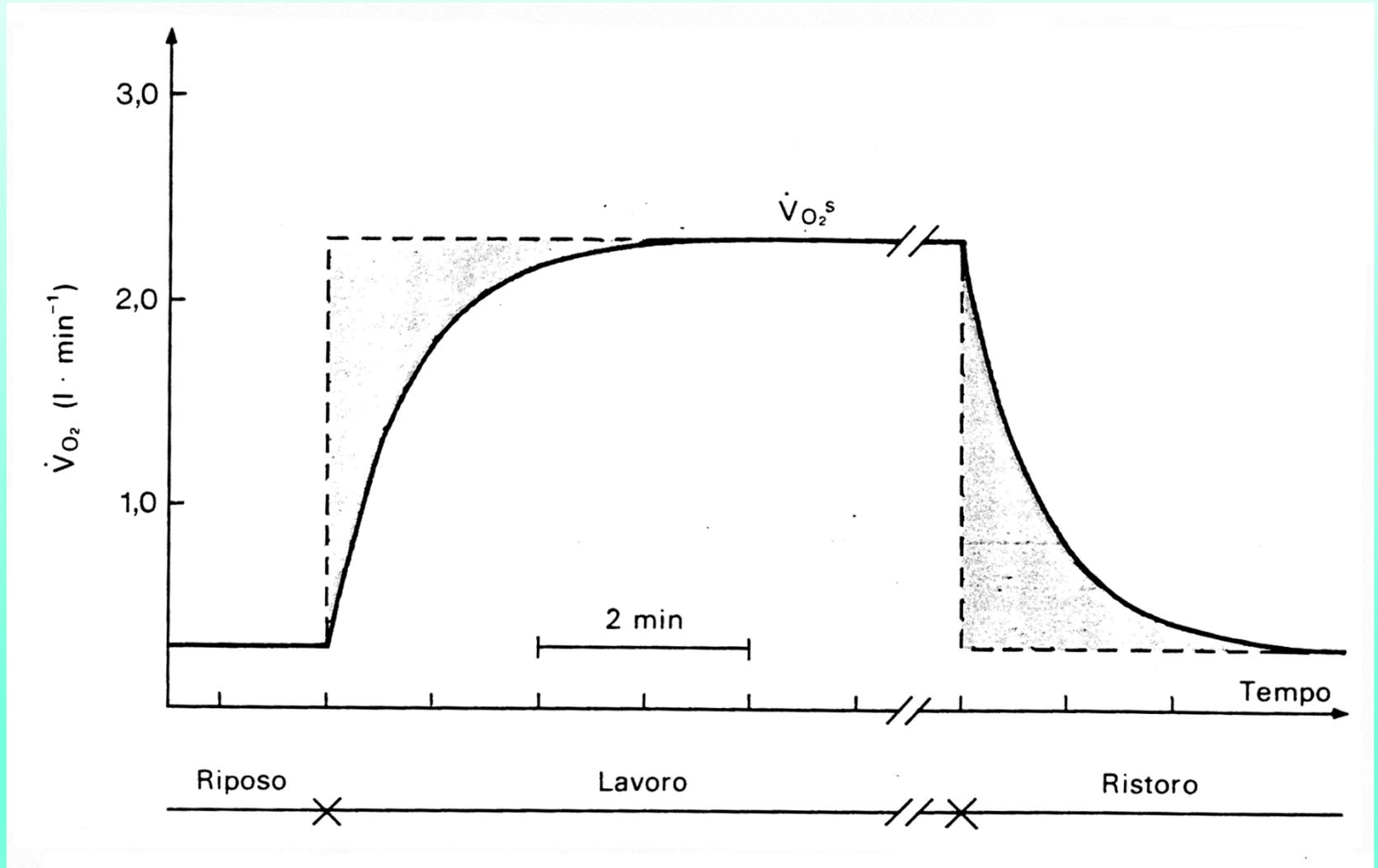
Iperaerobica

$$\text{ATP/O}_2 = 5.67$$

Ipoaerobica + Iperaerobica: $\text{ATP}/\text{O}_2 = 6.17$



Gli stati non-stazionari



$$E' \propto \text{ATP}' = \text{ATP}' = c V'O_2 + bLa' + \text{PCr}'$$

Il deficit di ossigeno

- Quota “obbligatoria”

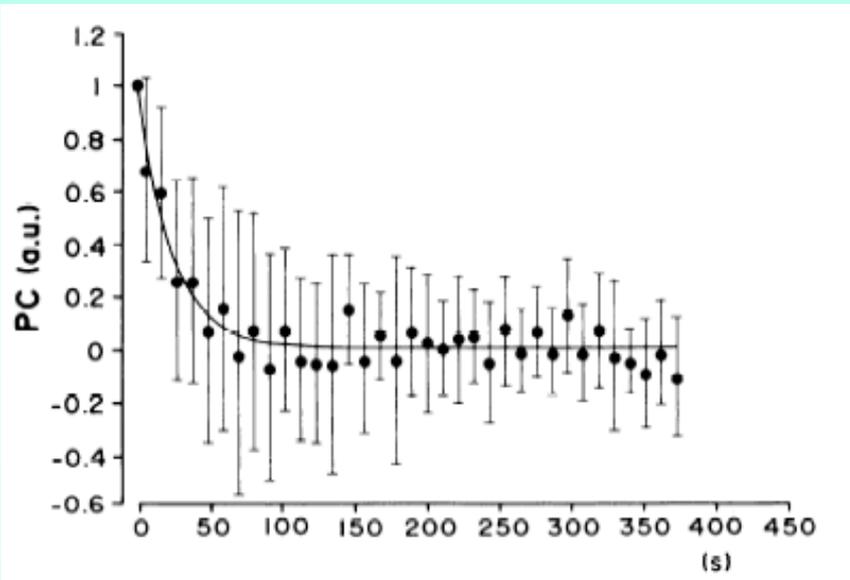
1. Scissione dei fosfati energetici (PCr)

- funzione lineare dell'intensità di esercizio
- non dipende dalla durata

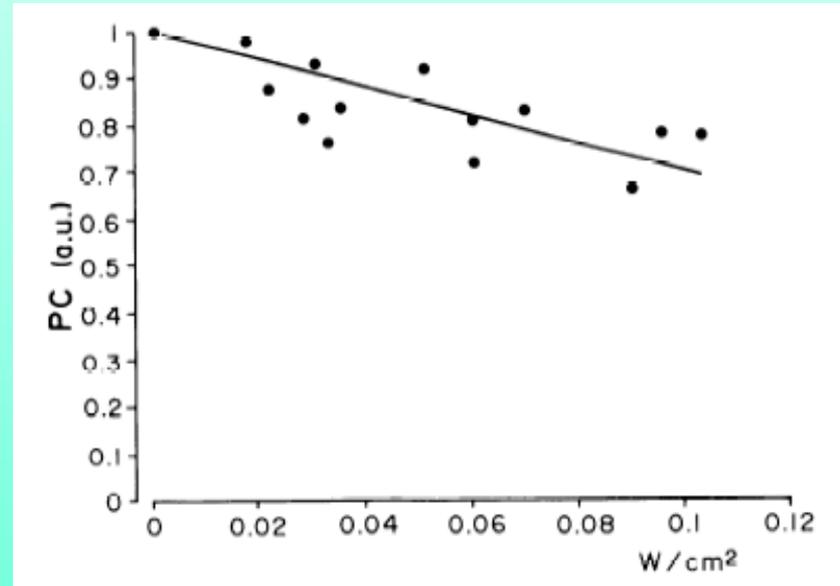
Durante esercizio di intensità moderata, la quota obbligatoria è l'unica componente presente del deficit di ossigeno

$$E' \propto ATP' = ATP' = c V'O_2 + PCr'$$

Il deficit di ossigeno



$T = 23.3 \text{ s}$ $t^{1/2} = 16.5 \text{ s}$



**PC lineare negativa
con potenza**

Il deficit di ossigeno

- **Quota dipendente dall'intensità di esercizio**
 - 1. Lattato precoce (early lactate)**
 - 2. Lattato tardivo (late lactate)**
 - 3. Deplezione delle riserve corporee di O₂**

Metabolismo anaerobico lattacido

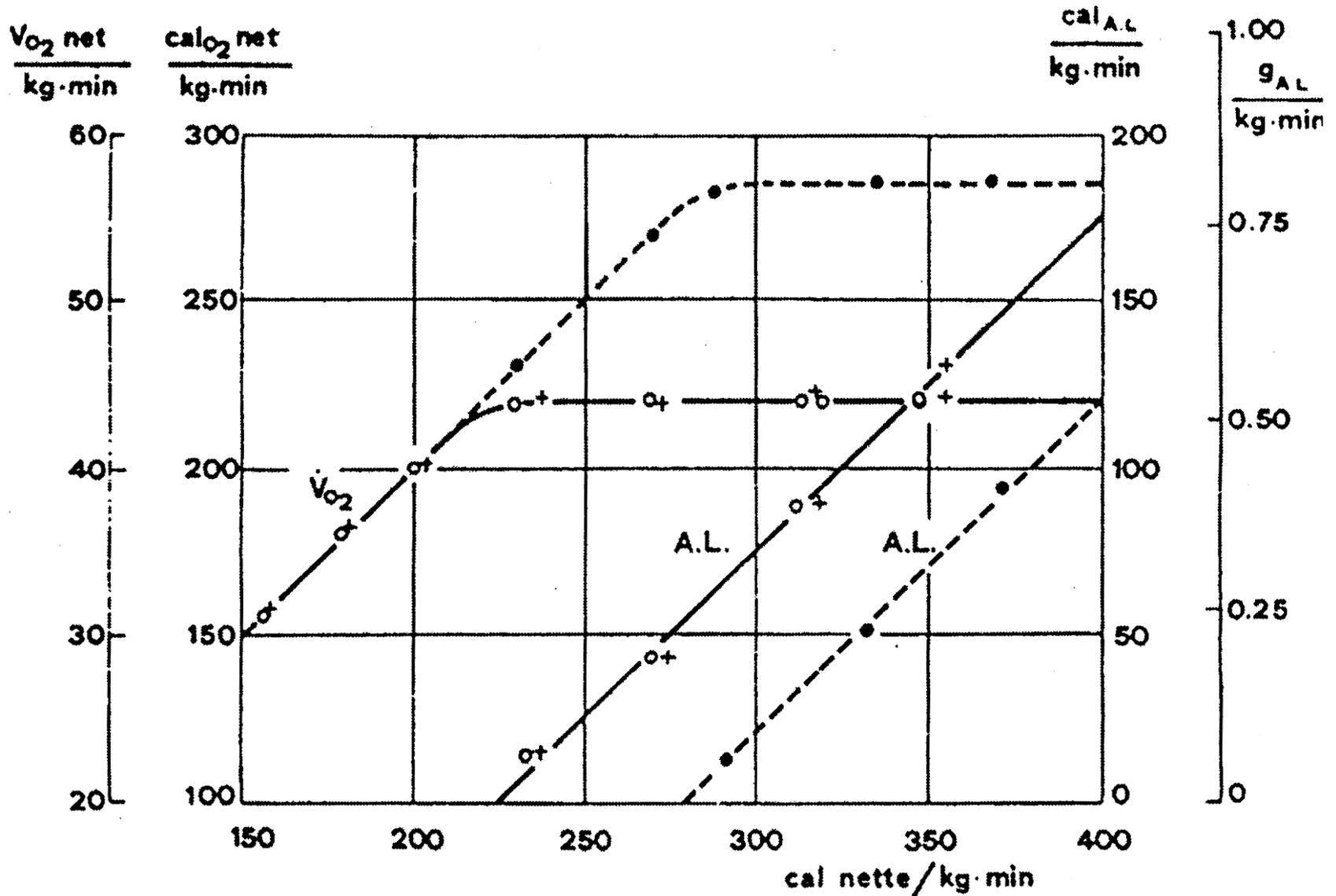
$$E'_{\max} = c V'O_{2\max} + b La'$$

Dove **b** è l'equivalente energetico del lattato

Equivalente energetico del lattato

- Il picco di concentrazione di lattato è raggiunto al 5° - 8° minuto di ristoro**
- È identico in tutti i distretti corporei**
- Il corpo è costituito per l'ottanta per cento d'acqua**
- Il sangue è costituito per il sessanta per cento d'acqua**

Equivalente energetico del lattato



Equivalente energetico del lattato

$$\beta = (\Delta E / \Delta t) / [(\Delta[\hat{L}a]_b / \Delta t)]$$

$$\beta = \Delta E / \Delta[\hat{L}a]_b$$

222 cal g⁻¹

84 kJ mol⁻¹

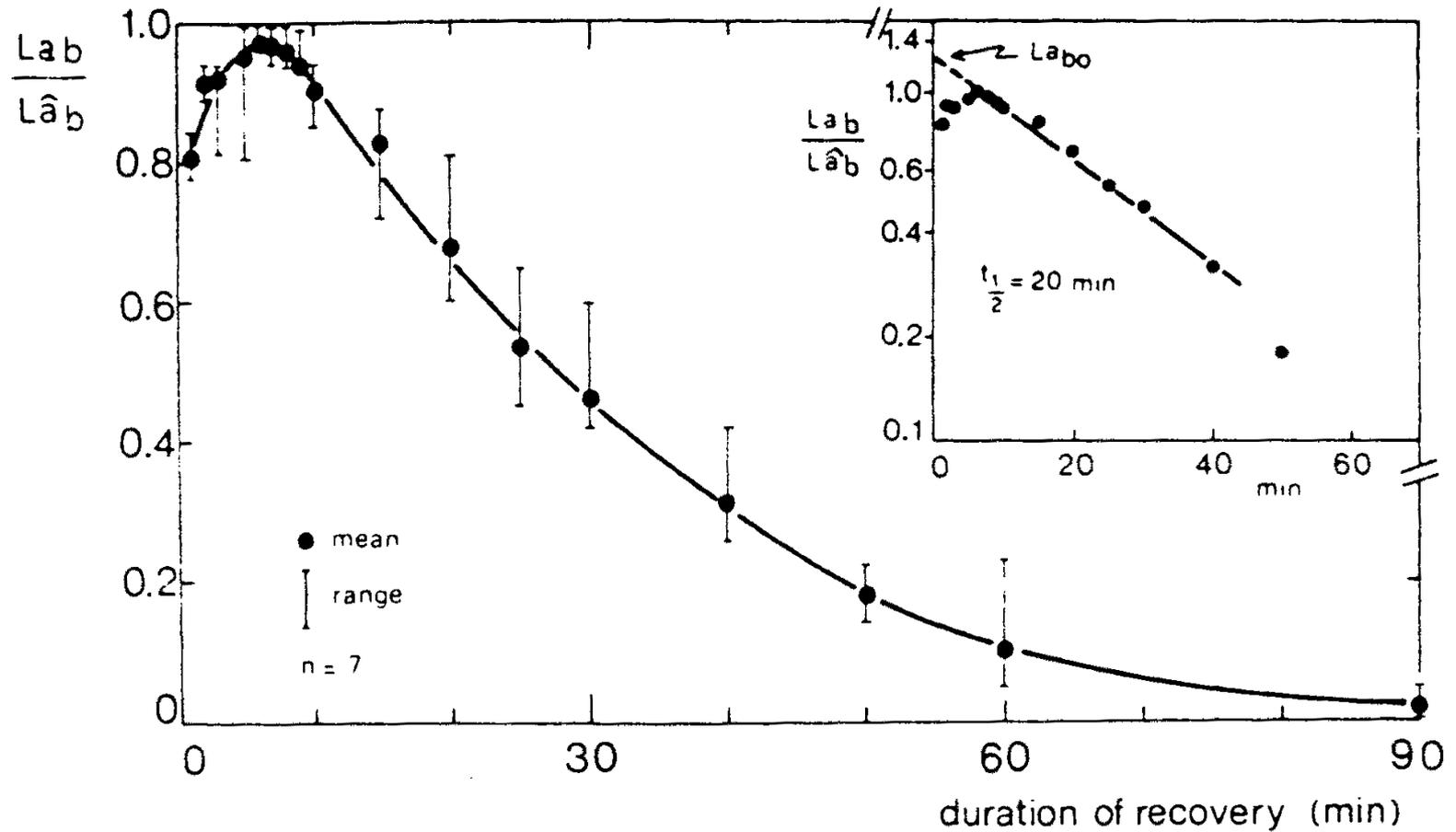
3 ml kg⁻¹ mM⁻¹

Equivalente energetico del lattato

la **cinetica** di scomparsa del lattato durante il *recovery* dovrebbe seguire un andamento **mono esponenziale**

- $t^{1/2}$ di circa **15 min**;
- **più veloce** se si compie esercizio aerobico;
- **indipendente** dal valore di picco di concentrazione di lattato.

Equivalente energetico del lattato



Equivalente energetico del lattato

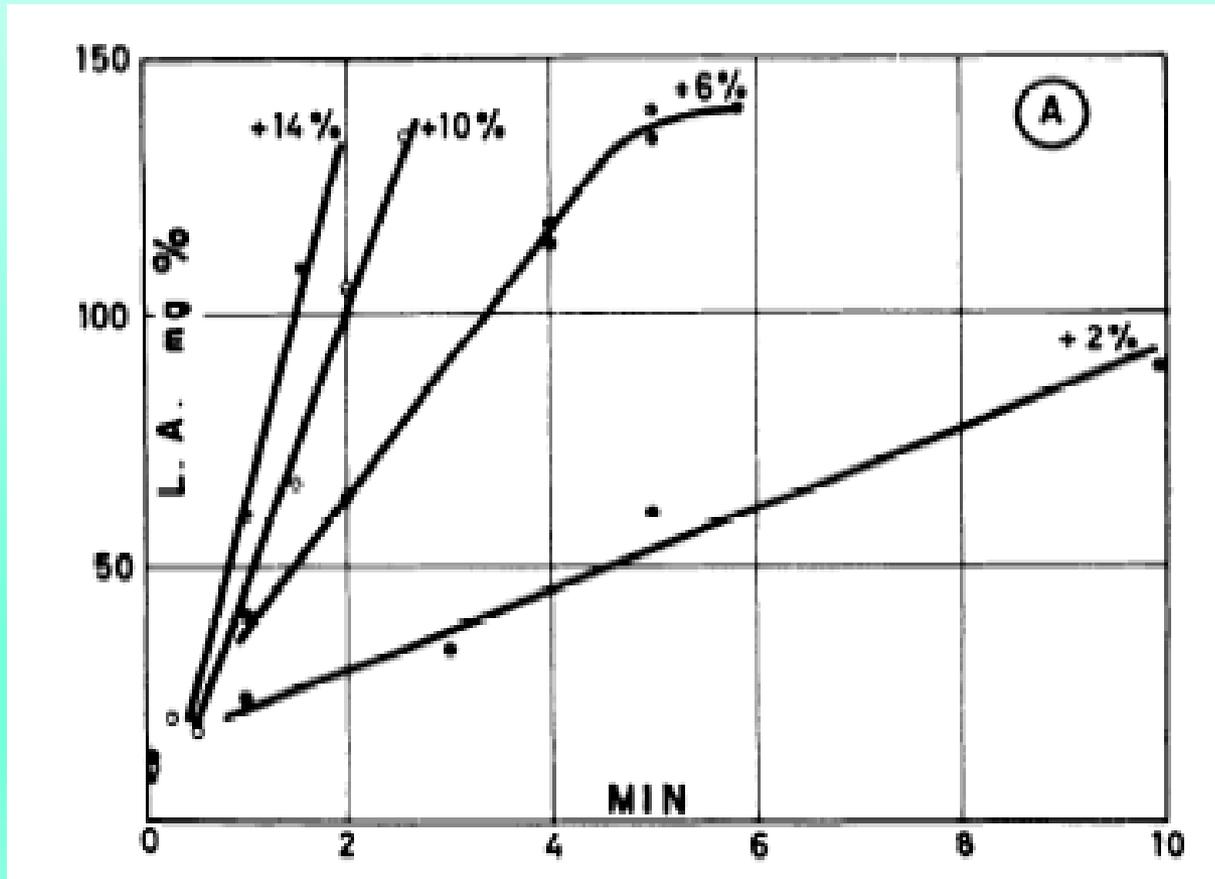
Di conseguenza:

- Il **picco** di concentrazione ematica di lattato è **direttamente proporzionale alla quantità totale di lattato accumulata in un kg di massa corporea nel corso dell'esercizio sovra-massimale;**
- La **velocità** di accumulo del lattato nel sangue (rapporto tra il picco di lattato ed il tempo di esercizio) è **direttamente proporzionale alla velocità di accumulo di lattato in un kg di massa corporea.**

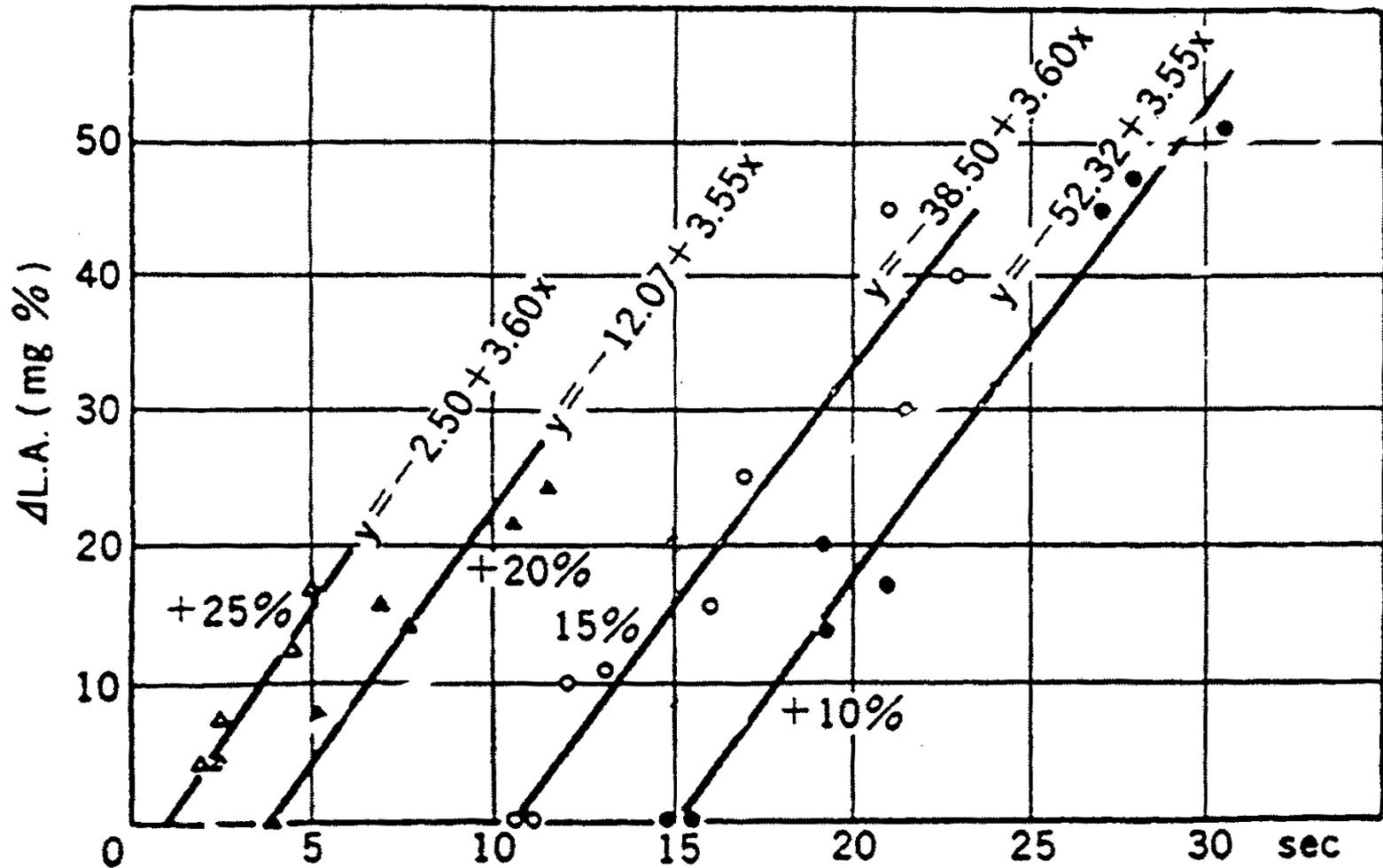
Massima potenza lattacida

- $d[\Delta L\hat{a}]_b/dt_{\max}$ raggiunge un valore massimo che non aumenta all'aumentare dell'intensità di esercizio
- l'intervallo di tempo dopo il quale $d[\Delta L\hat{a}]_b/dt_{\max}$ inizia ad aumentare, si accorcia all'aumentare dell'intensità di esercizio.

Massima potenza lattacida



Massima potenza lattacida



Massima potenza lattacida

75 ml O₂ kg⁻¹ min⁻¹

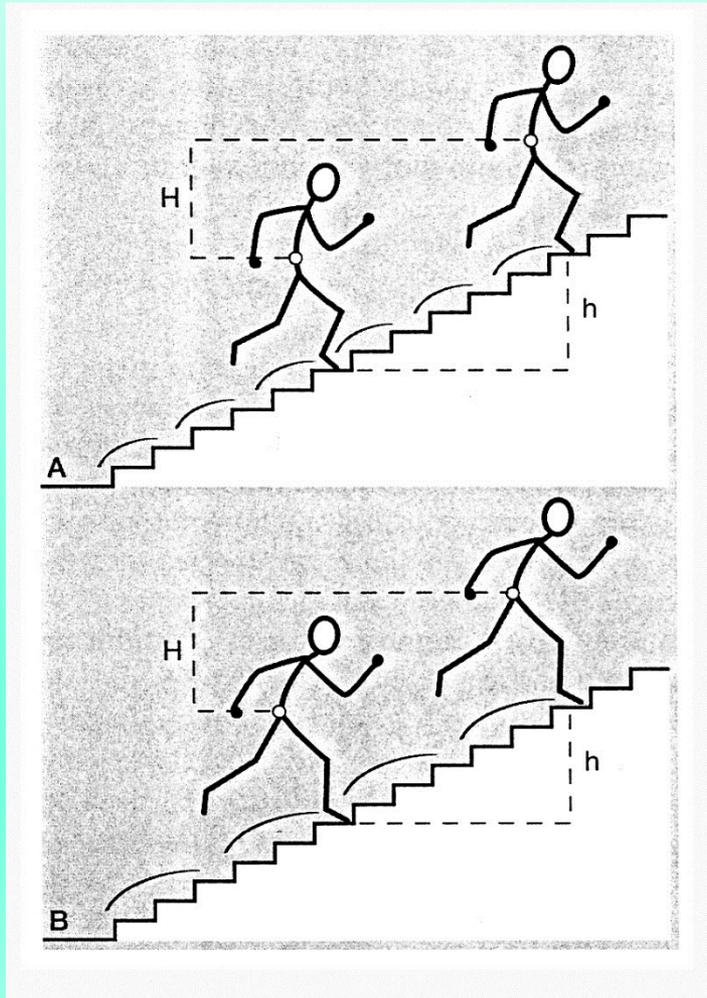
Metabolismo anaerobico alattacido

$$E' \propto \overrightarrow{ATP'} = \overleftarrow{ATP'} = c V'O_2 + bLa' + PCr'$$

$$E' \propto \overleftarrow{ATP'} = PCr'$$

$$w' = \eta E' = \eta PCr'/c = \eta Al'$$

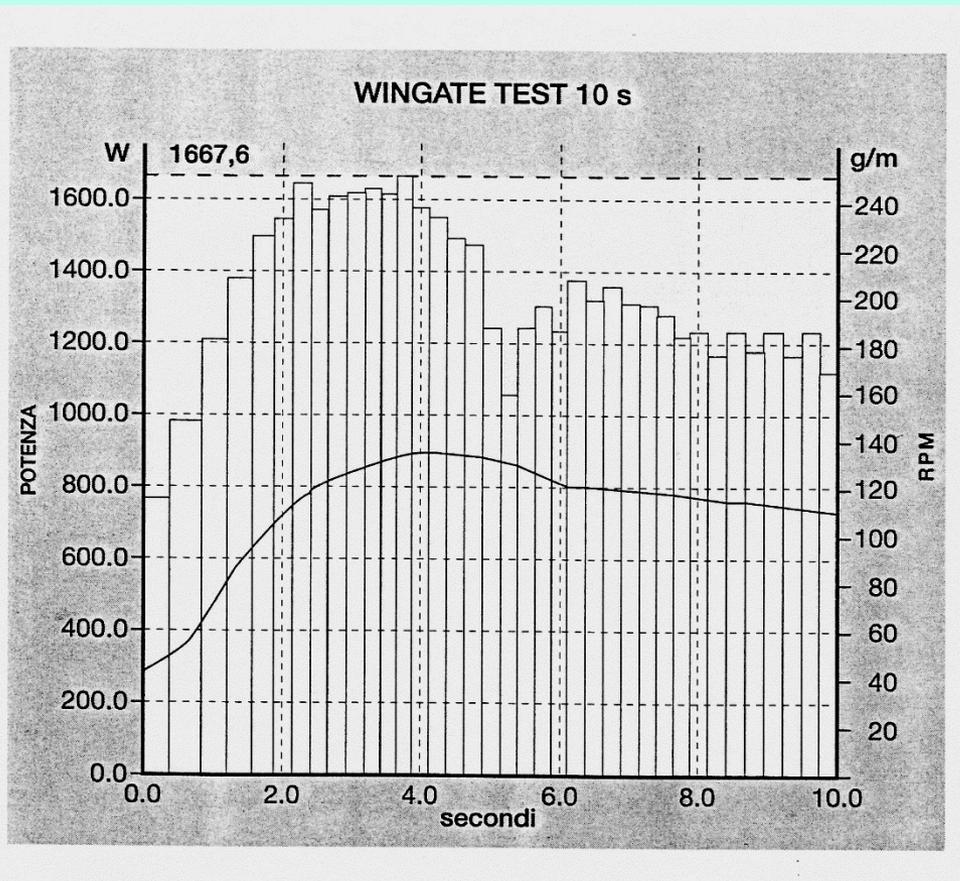
Massima potenza anaerobica alattacida



Potenza =

$$\text{Peso} * \text{VV} = (\text{kg} * 9.81) (\text{h} * \text{t}^{-1})$$

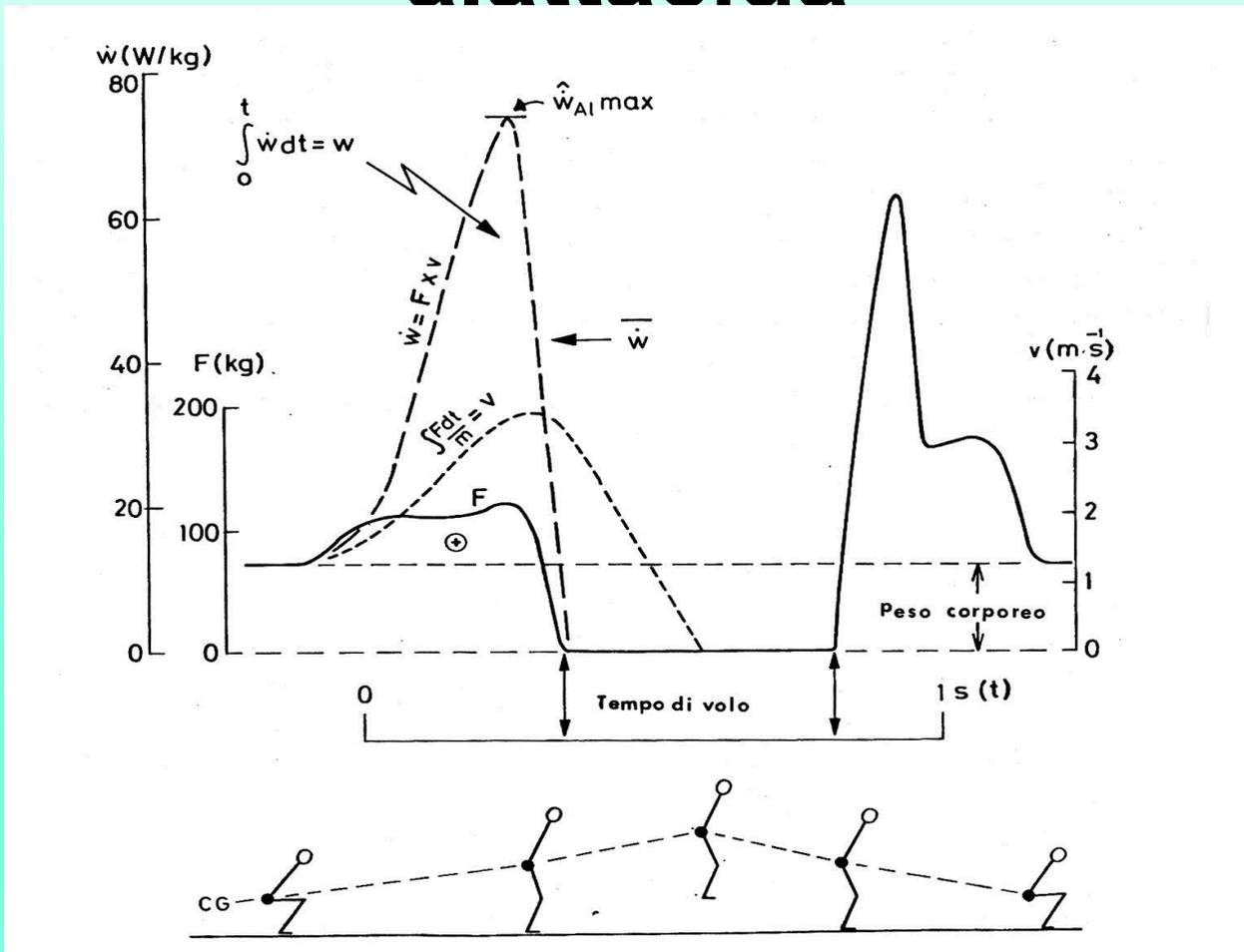
Massima potenza anaerobica alattacida



Potenza =

$$T * \omega = N m * rad s^{-1}$$

Massima potenza anaerobica alattacida



Massima potenza anaerobica alattacida

Tabella 84.IV – Sinapsi delle più importanti caratteristiche della massima potenza anaerobica alattacida ($\dot{A}_{l_{max}}$) per chilogrammo di peso corporeo. $\dot{A}_{l_{max}}$ è espresso in equivalente consumo di O_2 ($1 \text{ ml } O_2 \cdot \text{min}^{-1} = 0,35 \text{ W}$).

valore medio a 20 anni maschi ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	<u>maschi</u> femmine	<u>età 60 anni</u> età 20 anni	<u>atleti</u> non atleti	frazione spiegabile su basi ereditarie	differenze etniche
140-160	1,15-1,30	0,60	1,2-1,5	0,90	assenti

Tabella 84.V – Massima potenza anaerobica alattacida esplosiva: a) durante la fase di spinta di un salto a piè pari; b) durante 5 secondi di corsa alla massima velocità su una normale rampa di scale. Atleti di livello nazionale o regionale e sedentari di sesso maschile, o femminile, della stessa età. Il picco potenza durante la fase di spinta del salto a piè pari è da 1,7 a 2,3 volte maggiore che il valore medio indicato in a.

		sciatori		saltatori		sedentari	
		alpini	fondisti	alto	asta	maschi	femmine
massima potenza anaerobica alattacida ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	a	32,2	27,4	39,0	35,9	26,4	18,8
		$\pm 5,3$	$\pm 5,2$	$\pm 3,8$	$\pm 2,3$	$\pm 4,7$	$\pm 5,0$
	b	17,3	16,0	-	-	16,8	12,1
		$\pm 1,3$	$\pm 1,7$			$\pm 2,3$	$\pm 1,4$
sollevamento del centro di gravità (cm)		36,1	31,5	50,1	44,1	34,9	19,3
		$\pm 4,3$	$\pm 2,3$	$\pm 4,4$	$\pm 2,9$	$\pm 4,9$	$\pm 3,7$

Energetica dell'esercizio muscolare : riassunto

fonti energetiche		potenza massima W/kg	capacità massima kJ/kg	tempo di esaurimento
anaerobiche alattacide ($\dot{A}l_{max}$)	A	70-80	0,85	6 secondi
	NA	50-55	0,75	
anaerobiche lattacide	A	25-30	1,1	40 secondi
	NA	20-25	0,9	
aerobiche ($\dot{V}O_{2max}$)	A	20-25	(4.000-8.000)	7-10 minuti
	NA	10-15		

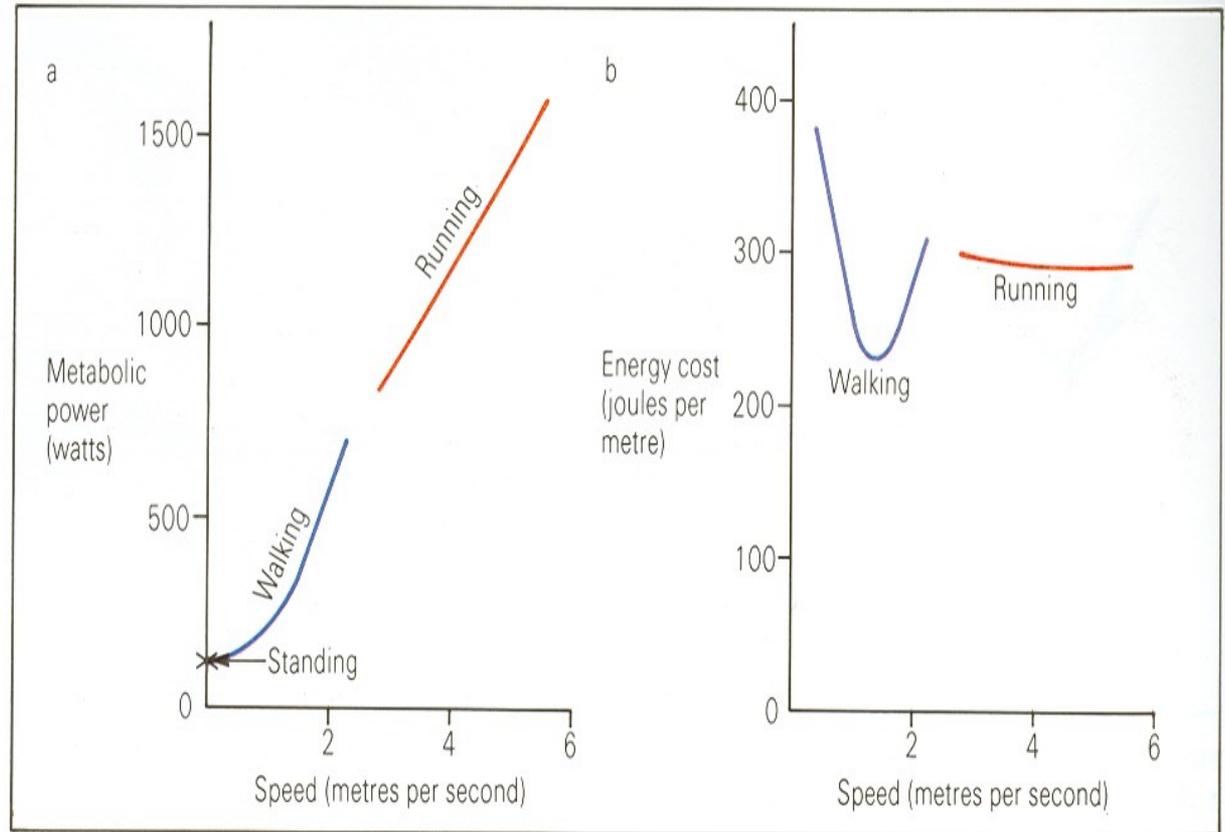
Costo energetico

$$C = \frac{E'}{v}$$

Costo energetico

FIG. 5.9 This woman is walking on a moving belt while her rate of oxygen consumption is measured. Photograph by Dr N.C. Heglund, Department of Animal Physiology, University of Nairobi.

FIG. 5.10(a) Power consumption (calculated from oxygen consumption) against speed for men walking and running, from the data of R. Margaria (1976) Biomechanics and Energetics of Muscular Exercise. Clarendon, Oxford. (b) Energy used per metre travelled (same data).



Letture consigliate

- **Fisiologia dell'Uomo, autori vari, Edi.Ermes, Milano**
- **Capitolo 21 e 22: Dagli Abissi allo Spazio, Ambienti e Limiti Umani, Ferretti G e Capelli C, Edi.Ermes, Milano**
- **Capitolo 1: Ambiente esercizio**