

Fattori limitanti
le massime prestazioni in
alcune forme di
locomozione

Pietro Enrico di Prampero

PPrampero@makek.dstb.uniud.it

usque ad veritatem

Partirò da una breve analisi dei fattori che determinano le massime prestazioni nella corsa su pista, che generalizzerò quindi a ciclismo, canottaggio, kayak, nuoto.

Il Costo energetico della corsa è la quantità di energia impiegata per unità di distanza

Simbolo: C, o Cr

Unità: kJ/km; J/(kg m)

[1 litro O₂ ≈ 5 kcal ≈ 21 kJ]

La potenza metabolica (E') è il prodotto del costo energetico (Cr) e della velocità (v) di corsa

$$Cr * v = E'$$

([ml O₂/m * m/min = ml O₂/min])

da cui: $v = E'/Cr$

quindi

$$v_{max} = E'_{max}/Cr$$

In condizioni aerobiche
E'max è una funzione di VO₂max
e Cr è indipendente dalla velocità

in queste condizioni:

$$V_{\max, \text{aer}} = F * VO_{2\max} / Cr,$$

dove $F \leq 1.0$ è la frazione di VO₂max
sostenibile per tutta la durata dell'esercizio

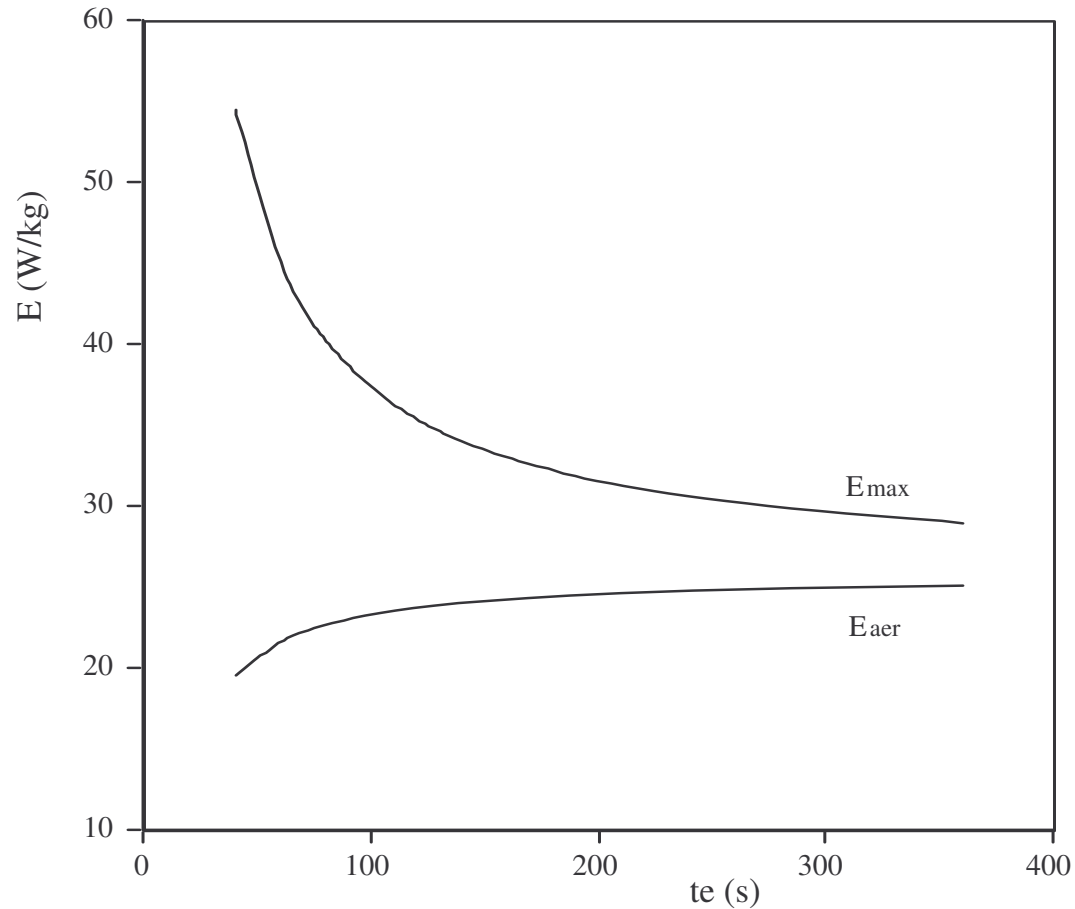
La quantità $F * VO_2\text{max}/Cr$, spiega più del 70 % della variazione della velocità reale nella corsa di lunga durata (di Prampero et al., 1986; Brueckner et al., 1991).

Nel caso di distanze più brevi, tuttavia, il contributo delle sorgenti anaerobiche di energia non può essere trascurato.

La relazione tra massima potenza metabolica (E'_{max}) e tempo di esaurimento (t_e), tra circa 50 s e 10 minuti, è una funzione di VO_2max , della massima capacità anaerobica (AnS) e della costante di tempo (τ) per raggiungere VO_2max (Wilkie, 1980):

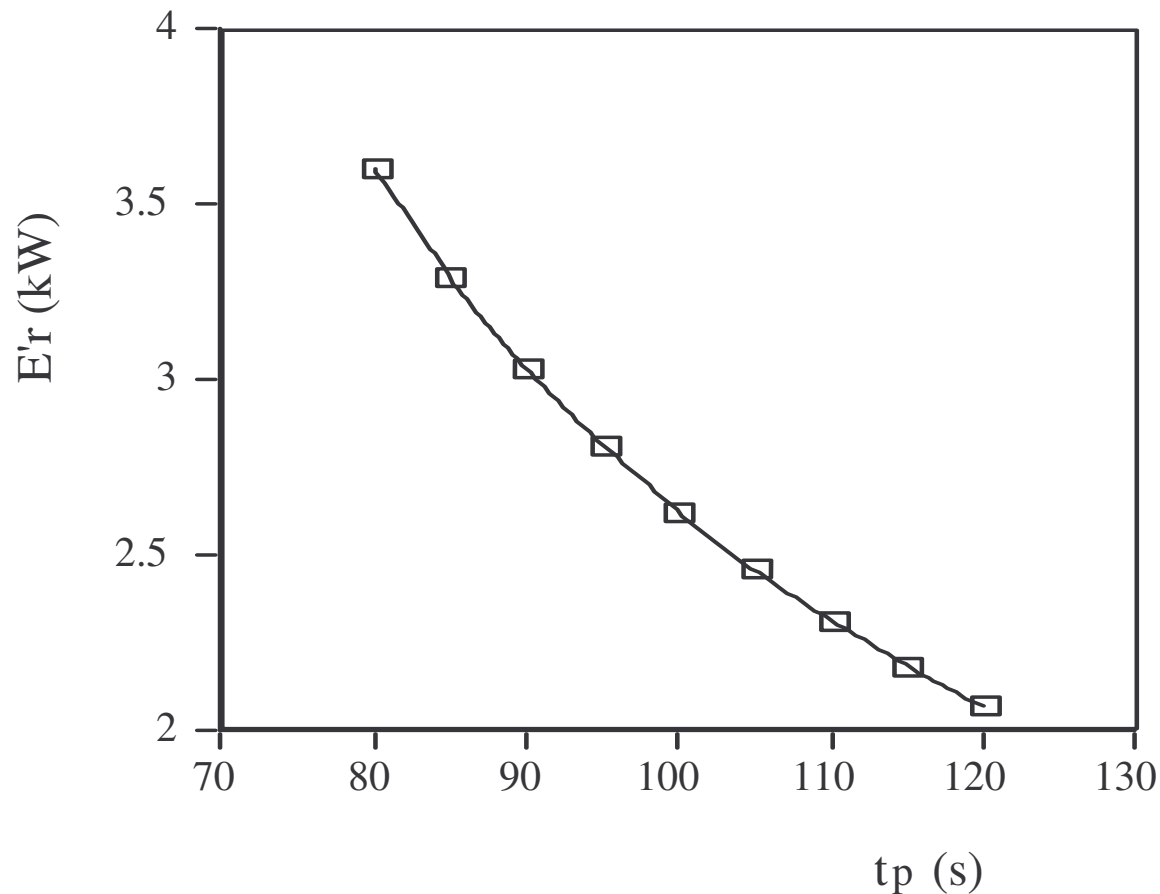
$$E'_{max} = VO_2max + AnS/t_e - [VO_2max * \tau (1 - e^{-t_e/\tau})] / \tau$$

Quindi la relazione tra E'_{max} e t_e può essere descritta per un soggetto dato purché VO_2max , AnS e τ siano noti. Assumendo $VO_2max = 25.8$ W/kg (74 ml O_2 /(kg min)) al di sopra del valore di riposo, AnS = 1.4 kJ/kg (68 ml O_2 /kg) e $\tau = 10$ s, per un atleta di élite:

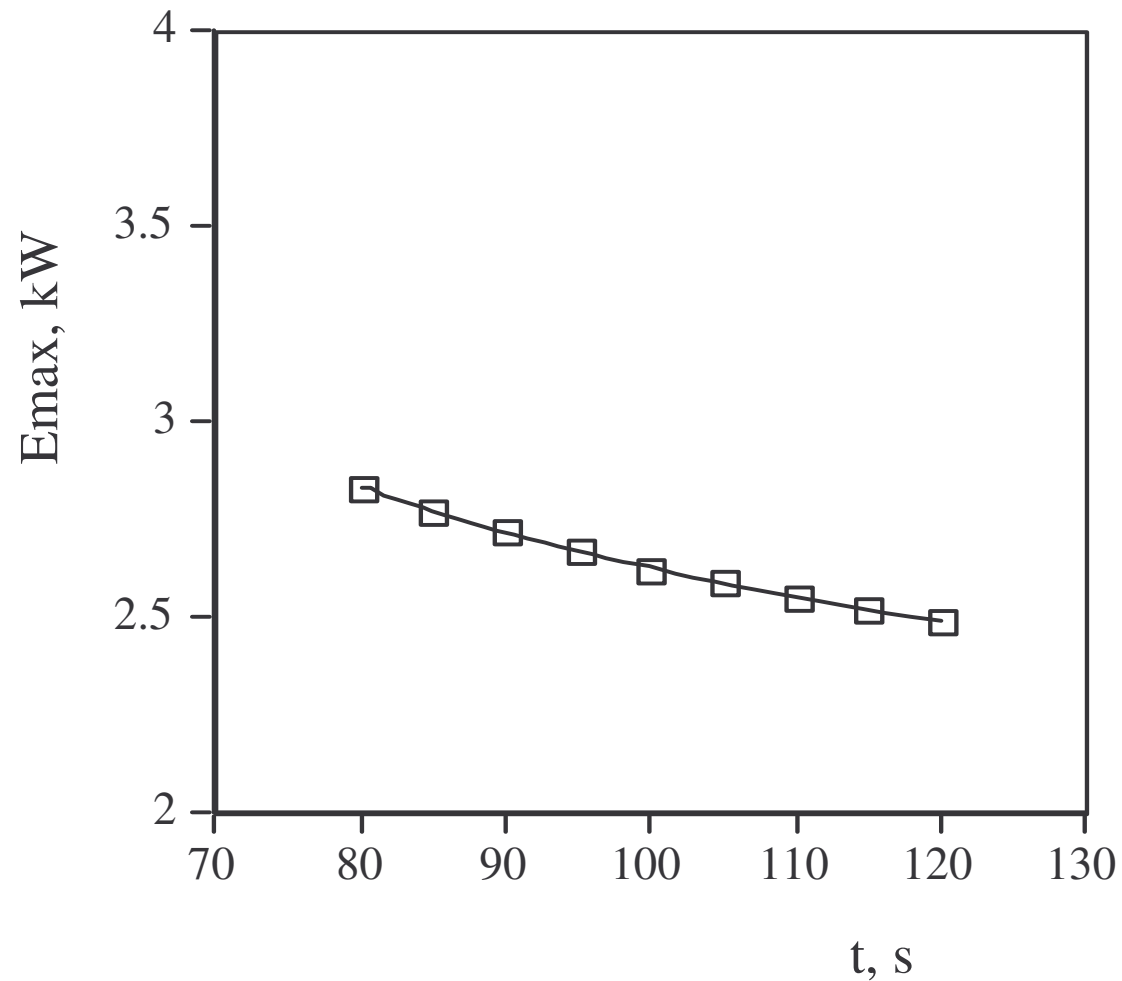


Massima potenza metabolica (E_{max} , W/kg) per un atleta di élite, in funzione del tempo di esaurimento da 40 a 360 s. La curva in basso (E_{aer}) rappresenta il contributo medio (nel tempo indicato) delle sorgenti di energia aerobica.

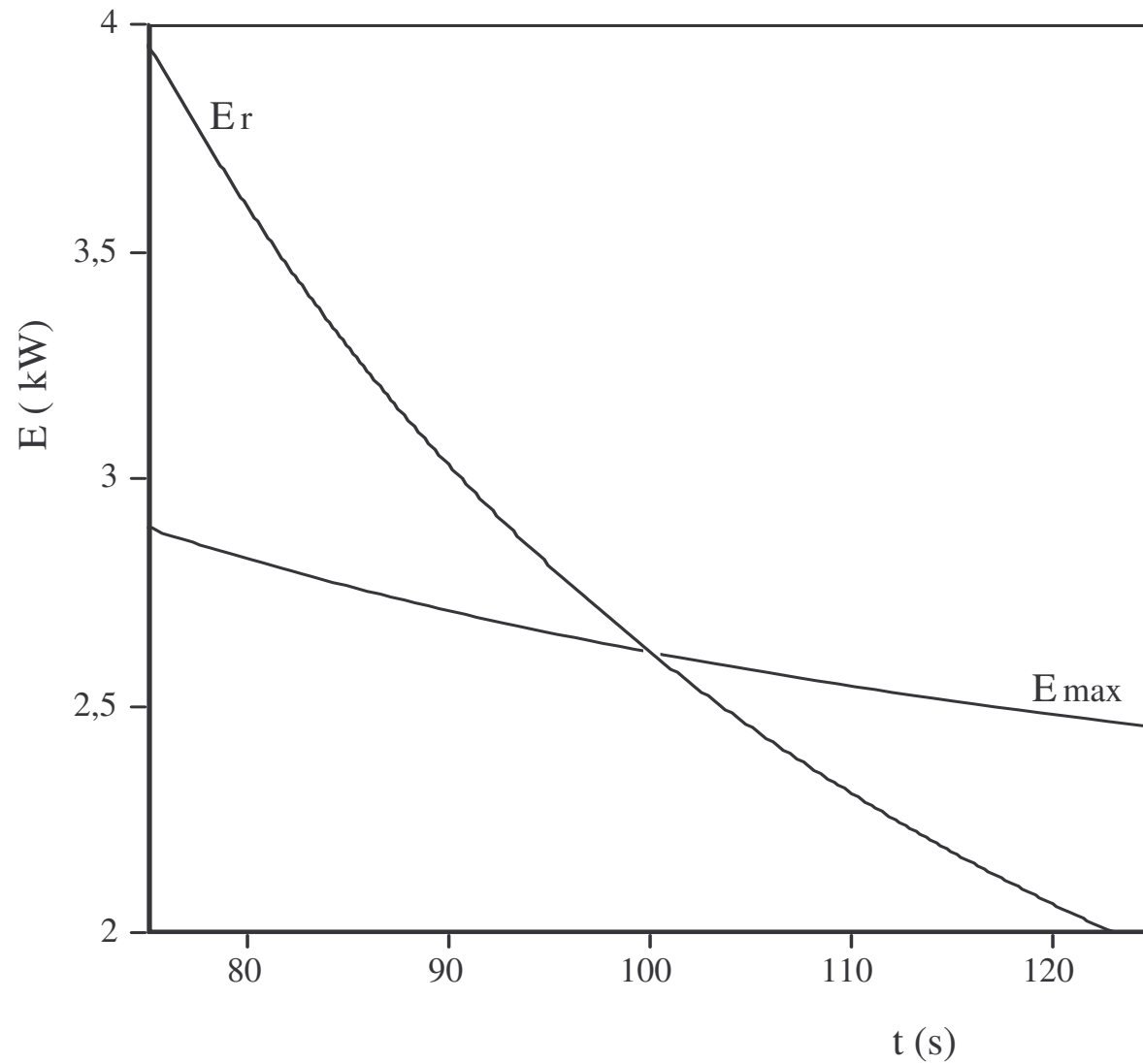
La potenza metabolica richiesta ($E'r$) è il prodotto di Cr per la velocità v : $E'r = Cr * v$. Per una distanza data (d): $E'r = Cr * (d/tp)$, dove tp è il tempo della prestazione. Quindi, se Cr è conosciuto, $E'r$ può essere calcolato, per ogni distanza data, in funzione di tp . **Per es., per gli 800 m:**



Per i tempi indicati sull'ascissa della figura precedente, la massima potenza metabolica (E'_{max}), descritta dall'equazione di Wilkie, è riportata qui sotto:



E' ora possibile sovrapporre sullo stesso asse dei tempi le due funzioni $E'_{max} = f(t_e)$ e $E'_r = f(t_p)$:

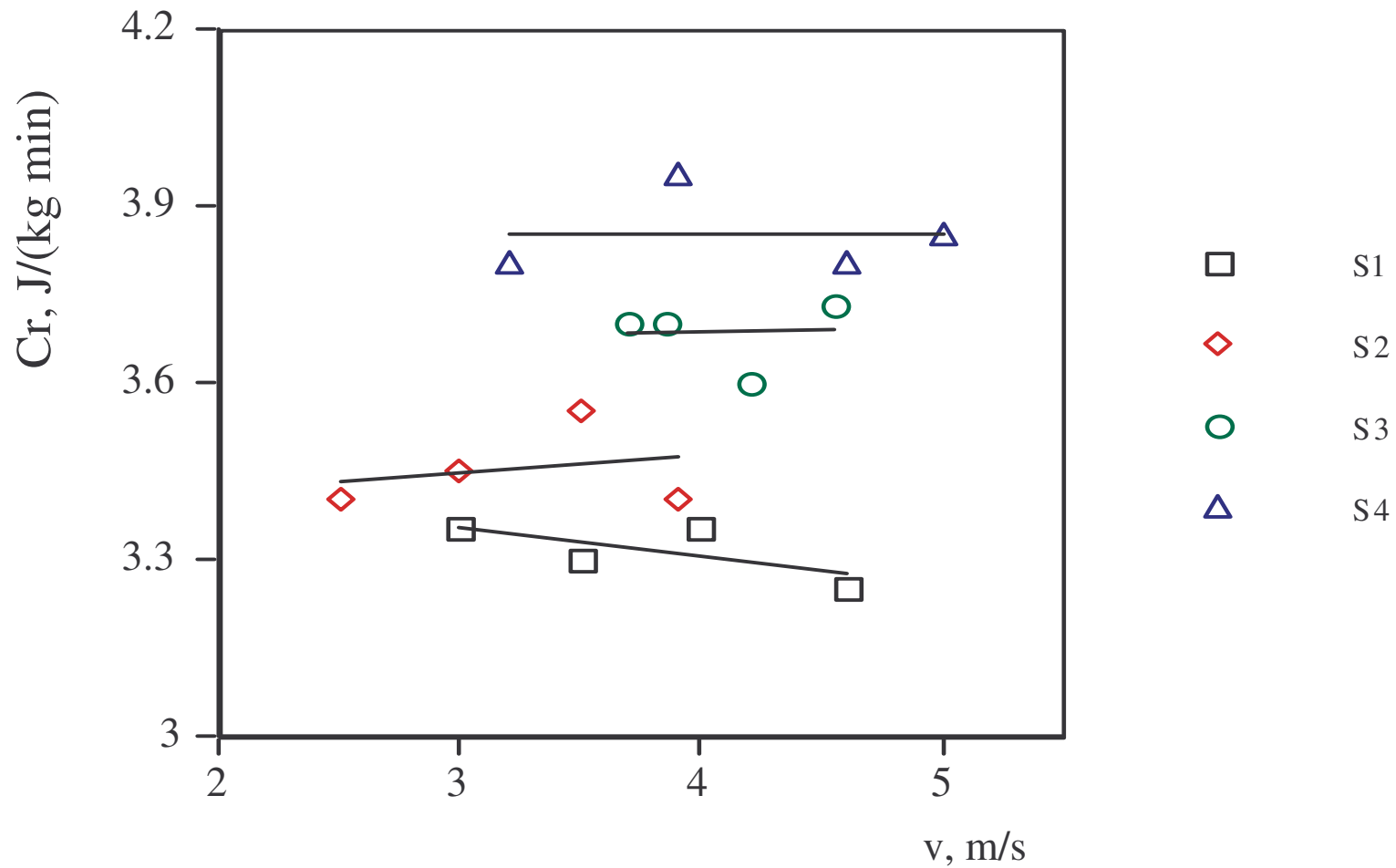


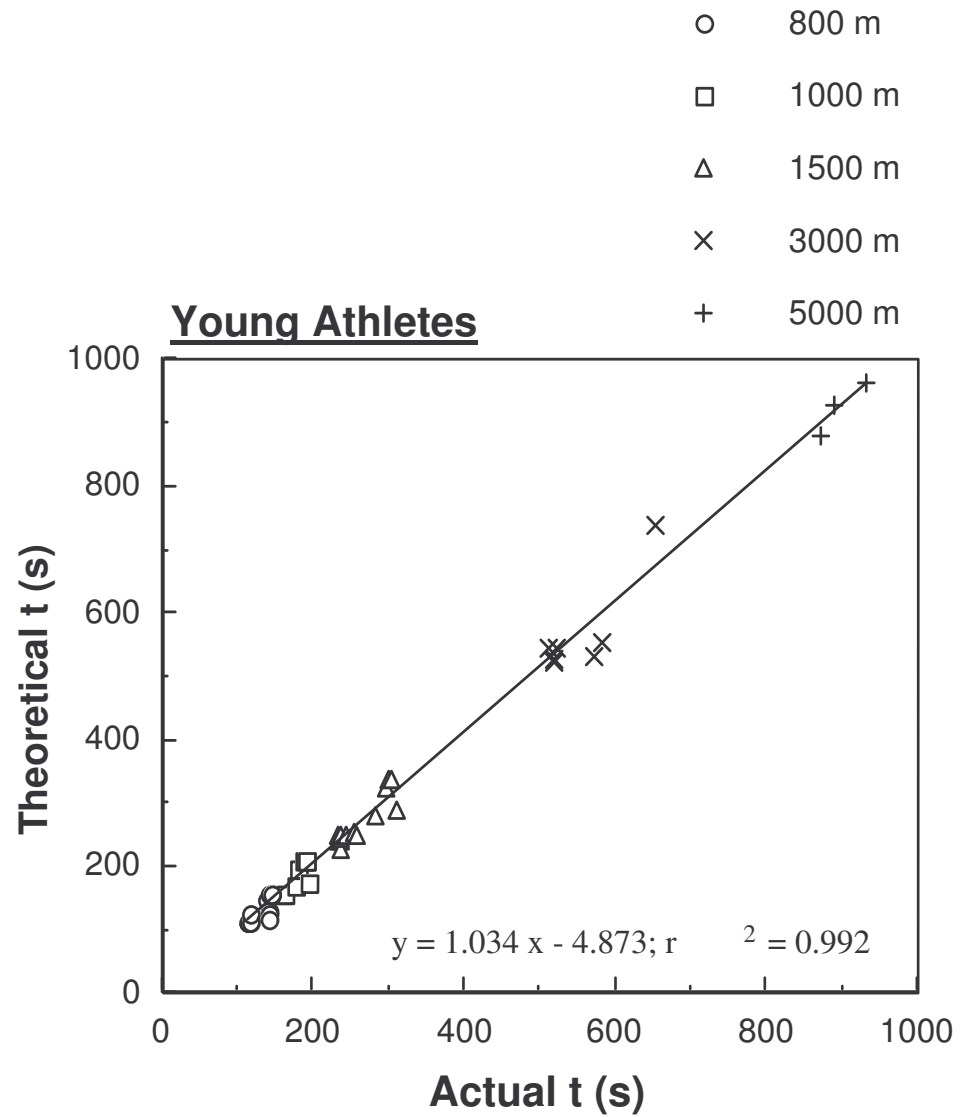
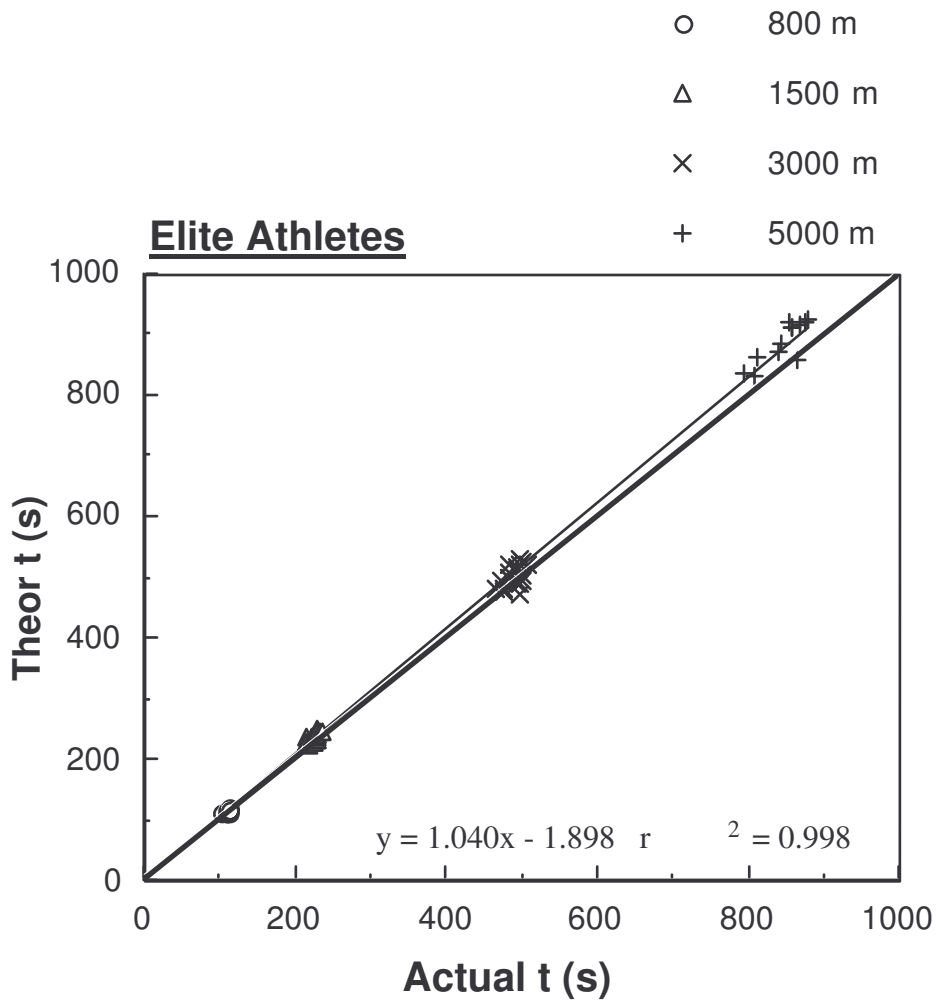
In una prestazione massimale, tempo di esaurimento e di prestazione coincidono. Quindi, il valore di ascissa (tempo) per cui le due funzioni si incrociano, cioè il valore per cui $E'_{max} = E'_r$ rappresenta il miglior tempo individuale.

In due gruppi di atleti, abbiamo determinato Cr e VO_2max e, assumendo AnS e τ dai dati della letteratura, abbiamo calcolato i tempi delle migliori prestazioni *teoriche* su distanze da 800 a 5000 metri e le abbiamo paragonate ai tempi *reali* realizzati sulle stesse.

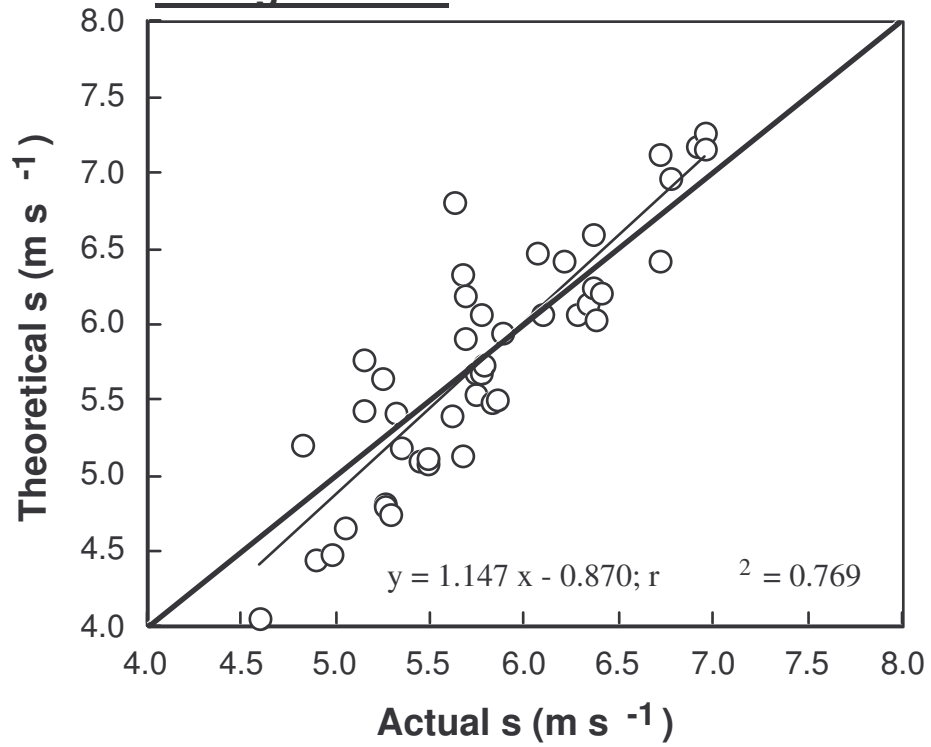
(Cr e VO_2max di atleti di massimo livello da Lacour et al., 1990)

Per tutti i soggetti, Cr è indipendente dalla velocità. Sono qui riportati i dati ottenuti sui due soggetti più economici (S3 e S4) e sui due meno economici (S1 e S2).

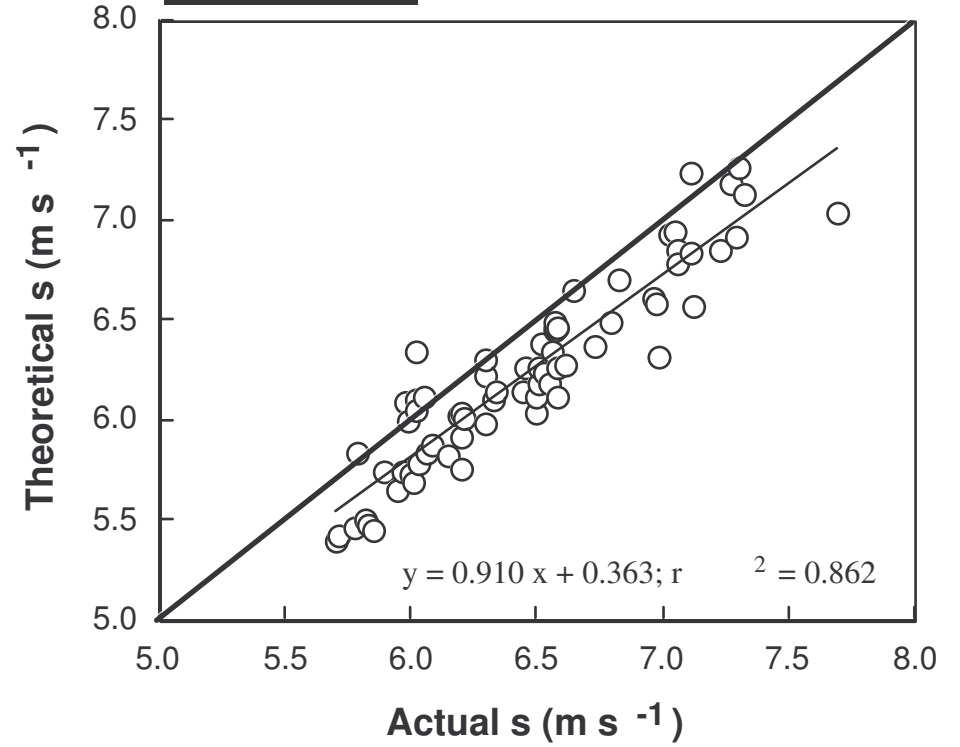




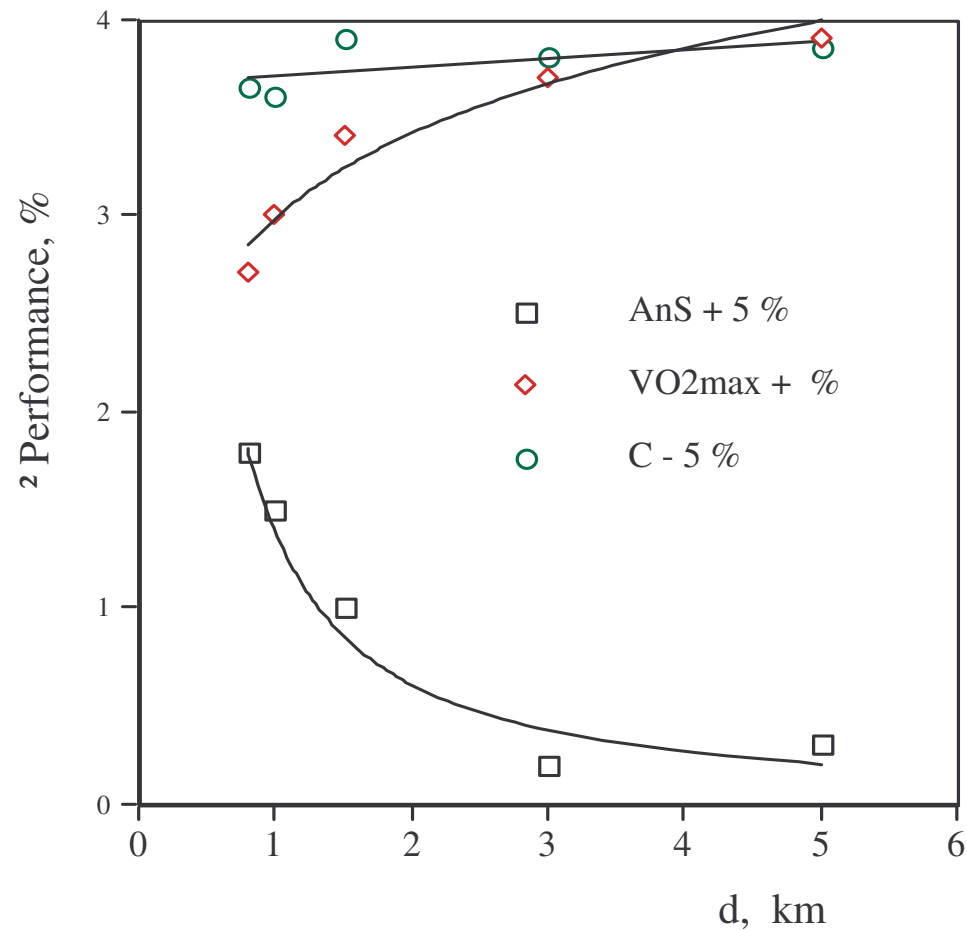
Young Athletes



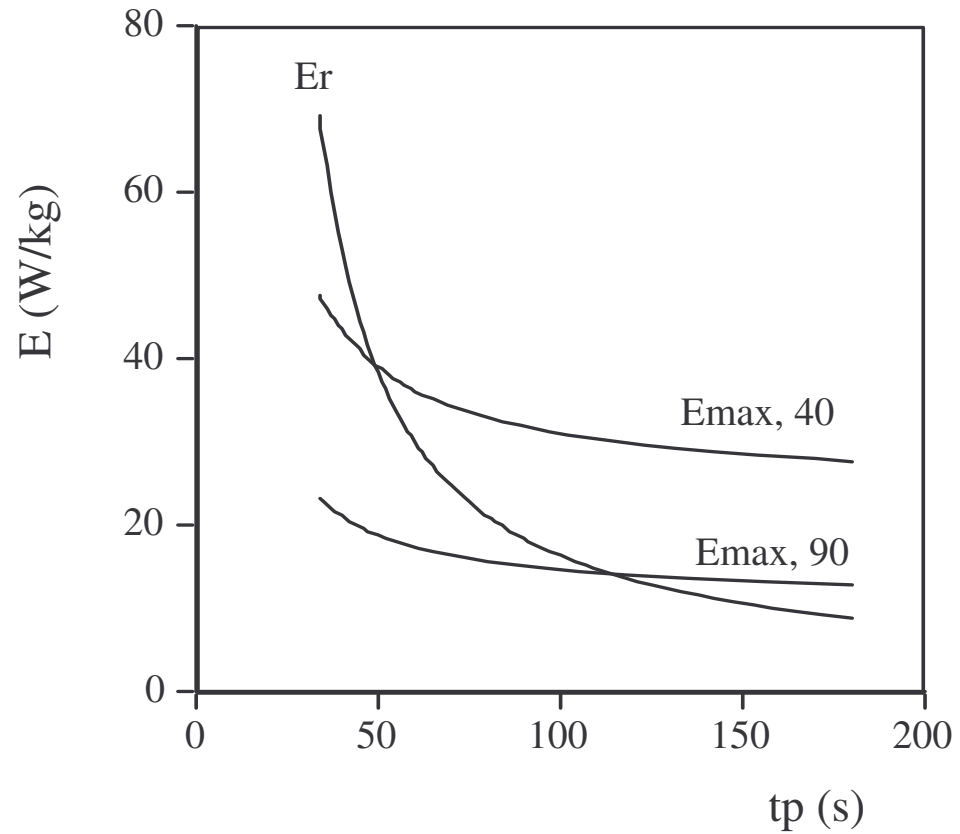
Elite Athletes



Aumento della prestazione (%) in funzione della distanza percorsa (d, km), quando VO₂max o la massima capacità anaerobica (AnS) aumentino del 5 %, o il costo della corsa (Cr) diminuisca del 5 %



400 metri



E_r , potenza metabolica richiesta;
 $E_{max, 40}$, potenza met. max a 40 anni;
 $E_{max, 90}$, potenza met. max a 90 anni

Domande aperte

1.

L'accordo tra prestazioni previste e reali sarebbe probabilmente migliore se i valori individuali di AnS e τ venissero realmente misurati, anziché dedotti dalle letteratura.

Domande aperte

2.

Le gare di corsa piana si fanno con partenza da fermo. Quindi Cr deve includere anche l'energia necessaria ad accelerare il corpo nella fase iniziale della corsa. Nell'ambito delle distanze trattate (800 - 5000 m), l'energia cinetica ha un peso relativamente ridotto rispetto al consumo di energia totale (da circa il 10 % all' 1 %).

Tuttavia, se l'analisi è da applicarsi su distanze minori, un prerequisito fondamentale è una stima più precisa del costo energetico della fase iniziale della corsa.

Domande aperte

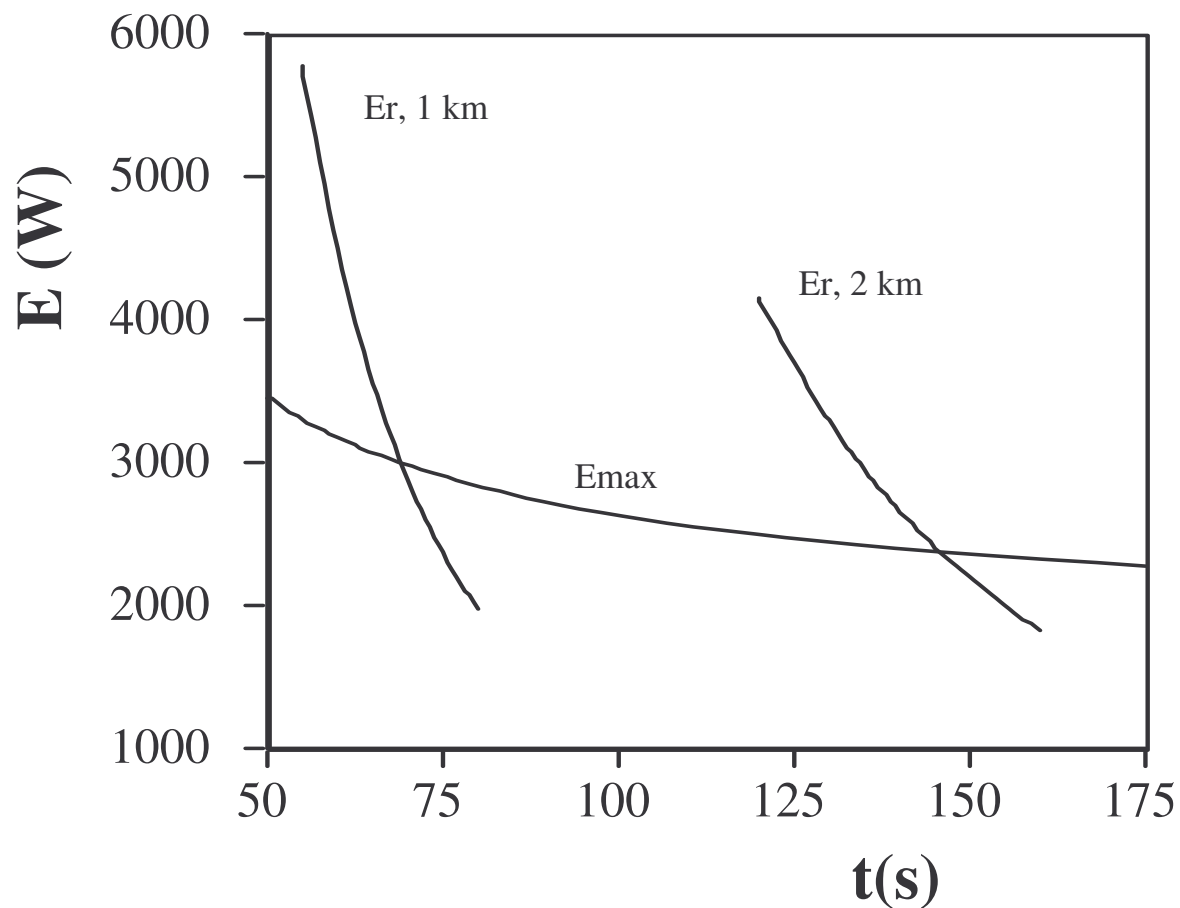
3.

Nei casi trattati la durata della prova variava tra 100 secondi e 14 minuti. Infatti, 100 s sono ampiamente sufficienti per la completa utilizzazione delle riserve anaerobiche e 15 minuti sono stati assunti come limite massimo affinché VO_2max possa essere mantenuto al 100 %.

Tuttavia, se l'analisi di cui sopra deve essere applicata a prestazioni di durata inferiore a circa 50 secondi o superiore a circa 14 minuti, è necessario conoscere la cinetica di utilizzazione delle riserve anaerobiche, o la diminuzione della frazione utilizzata di VO_2max .

Esperimenti analoghi sono stati effettuati nel ciclismo su pista. E_{max} , massima potenza metabolica; E_r , potenza richiesta

Ciclismo su pista, 1 km; 2 km



I rapporti (± 1 S.D.) tra tempi di prestazione reali e teorici e il numero di osservazioni (N) sono riportati per le distanze indicate nella tabella che segue.

I rapporti $t_{\text{reale}}/t_{\text{teorico}}$ indicati da asterischi sono significativamente diversi da 1. Ciò nonostante, l'accordo tra tempi reali e tempi teorici di prestazione sembra essere molto buono.

Da Capelli et al. (1998).

CICLISMO, dati da Capelli et al. (1998).

km	N	$t_{\text{reale}}/t_{\text{teorico}}$
1.02	10	0.980 ± 0.05
2.05	10	$1.035 \pm 0.027^*$
5.12	10	$1.056 \pm 0.043^*$
10.2	10	$1.070 \pm 0.061^*$
Totale	40	$1.035 \pm 0.058^*$

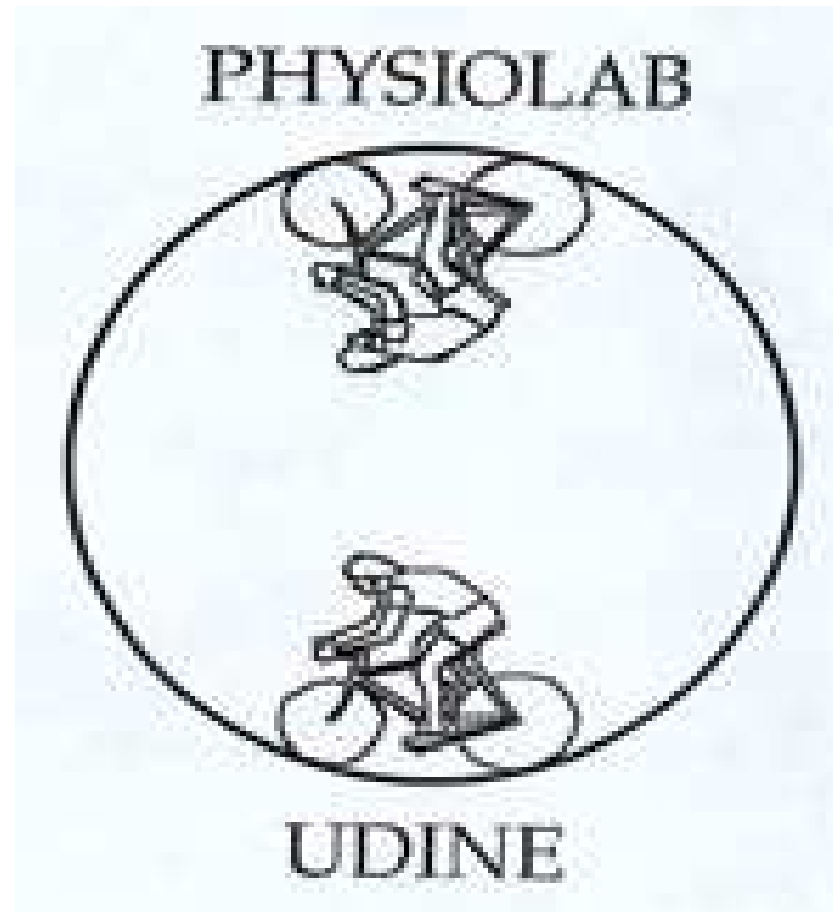
Conclusioni

La conoscenza del costo energetico e della massima potenza metabolica individuali consente di determinare il "collo di bottiglia" energetico che limita le migliori prestazioni nella corsa e nel ciclismo.

L'accordo tra teoria e fatti è una prova convincente che la nostra conoscenza dell'energetica dell'esercizio e della locomozione umana è piuttosto soddisfacente.

Analogamente, dovrebbe essere possibile determinare il "collo di bottiglia individuale" in ogni forma di locomozione in cui il costo energetico in funzione della velocità sia noto.

**Grazie
per la vostra attenzione**



Fattori limitanti le massime prestazioni in Canottaggio, Kayak, Nuoto

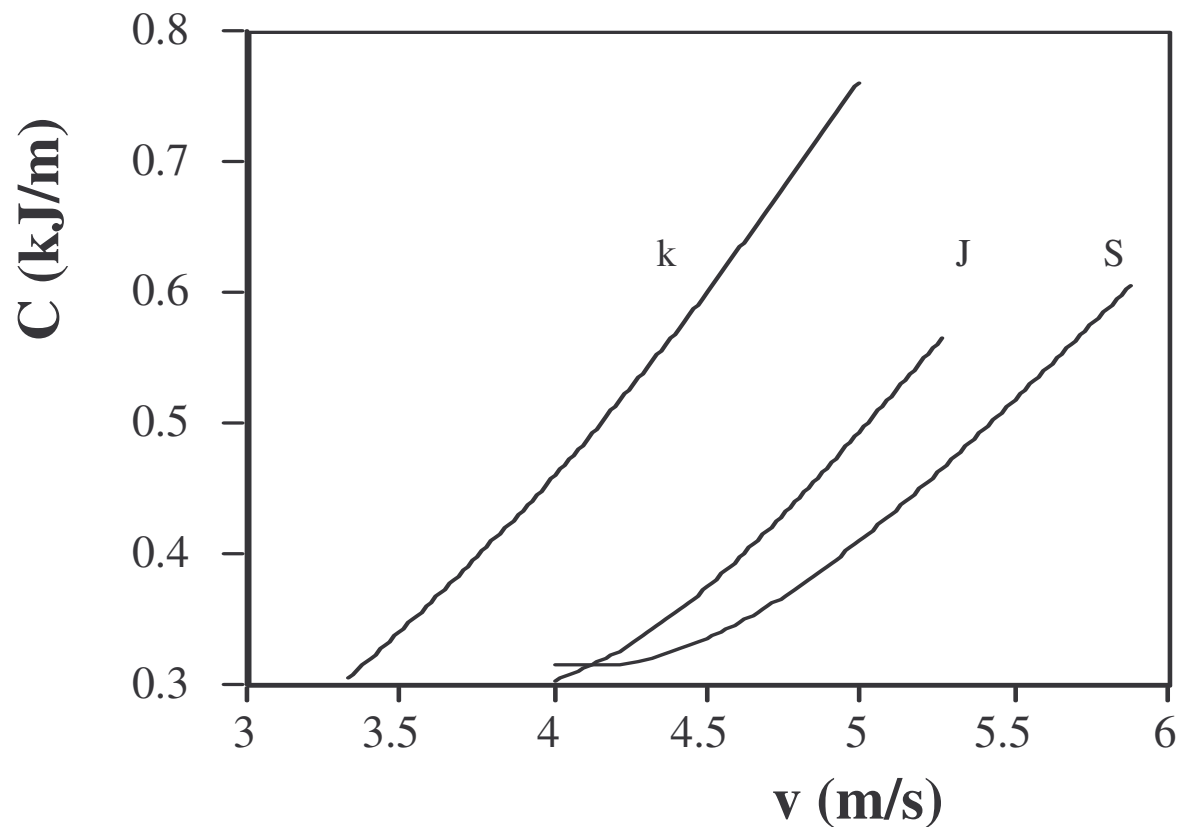
Pietro Enrico di Prampero

PPrampero@makek.dstb.uniud.it

usque ad veritatem

Applicherò ora il modello discusso in precedenza per corsa e ciclismo a **canottaggio, kayak e nuoto**. In questi casi manca, almeno per ora, un paragone diretto tra tempi di gara teorici e reali su singoli atleti. Mi limiterò quindi a discutere valori medi che, per altro illustrano bene l'applicabilità del modello anche a queste forme di locomozione.

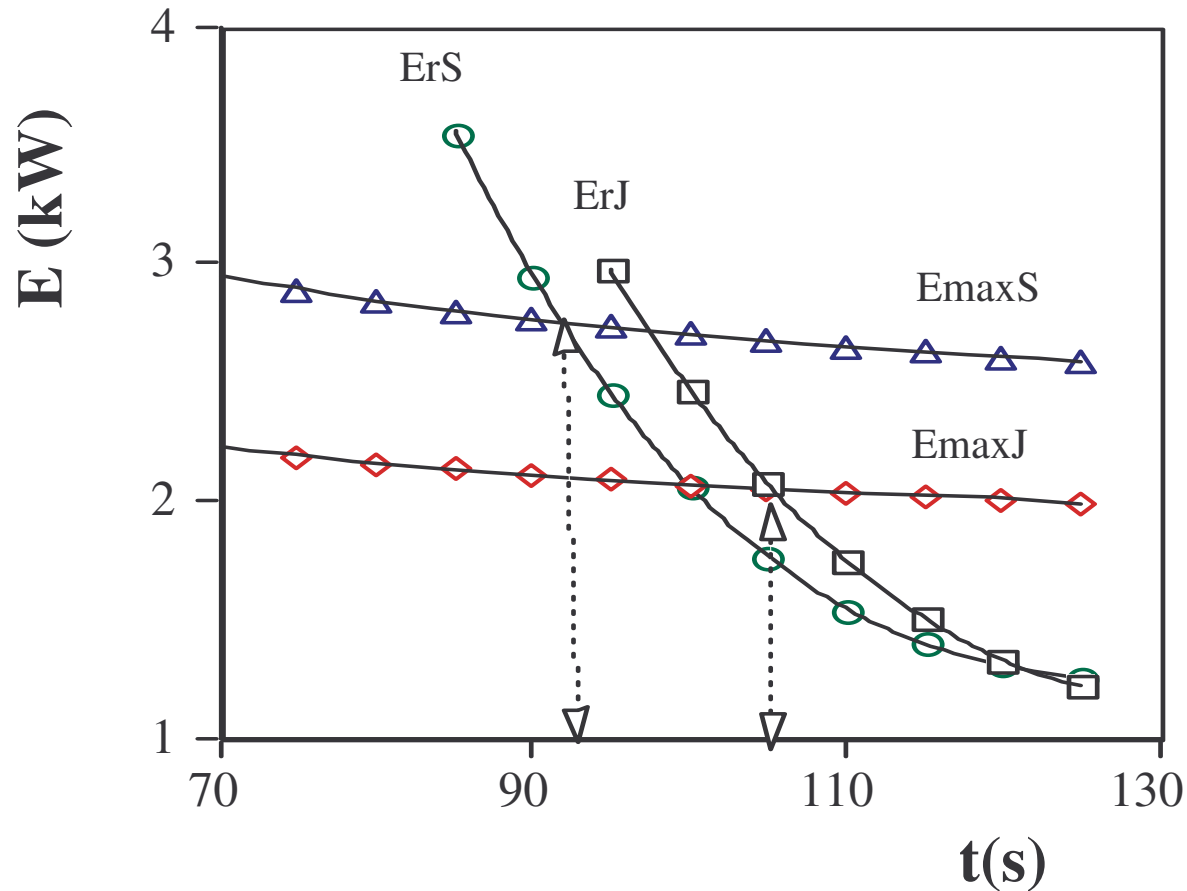
Costo energetico della progressione nel canottaggio e nel kayak, in funzione della velocità



Canottieri Juniores (J) Seniores (S)
(R.Colli et al., 2005)

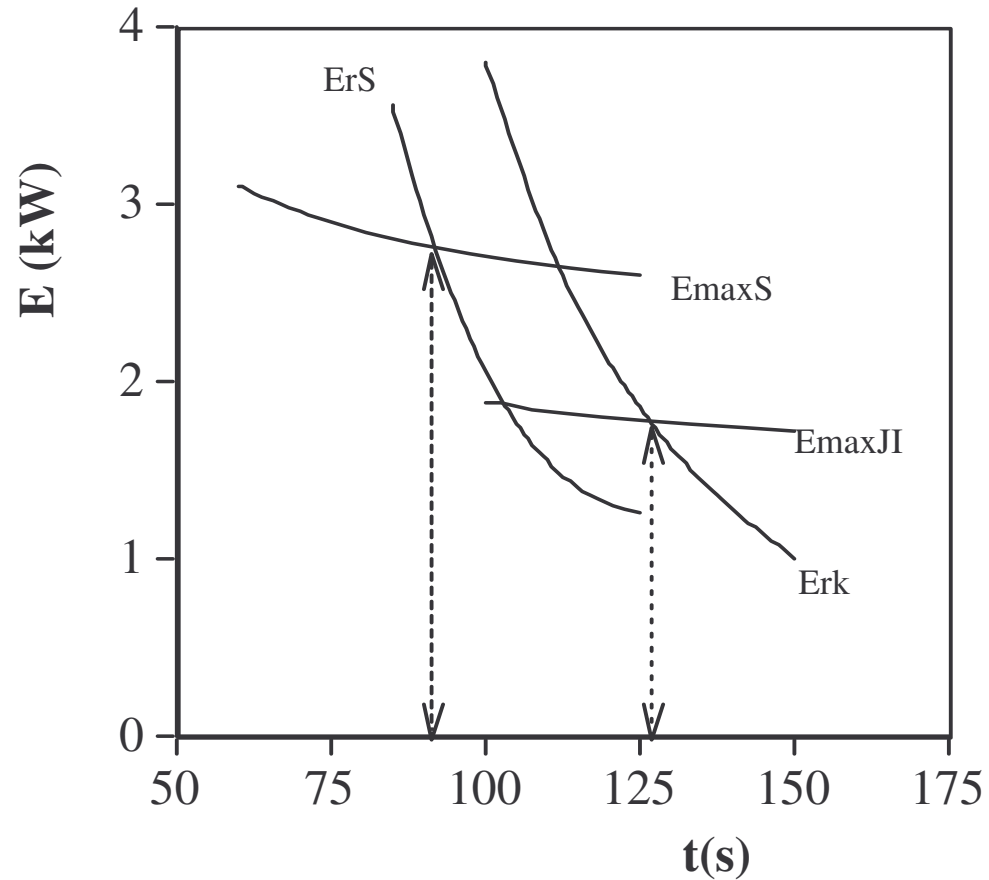
Kayak (k) (P. Zamparo et al., 1999)

Massima potenza metabolica disponibile (E_{max}) e potenza richiesta (E_r) per compiere 500 m nel tempo indicato.
Frecce: tempo record teorico di seniores (S) e juniores (J)



**Canottieri Juniores (J) Seniores (S);
500 m. R. Colli et al., 2005**

Canottieri Senior (ErS; EmaxS)
Kayak, J. Idem (Erk; EmaxJI)
500 m

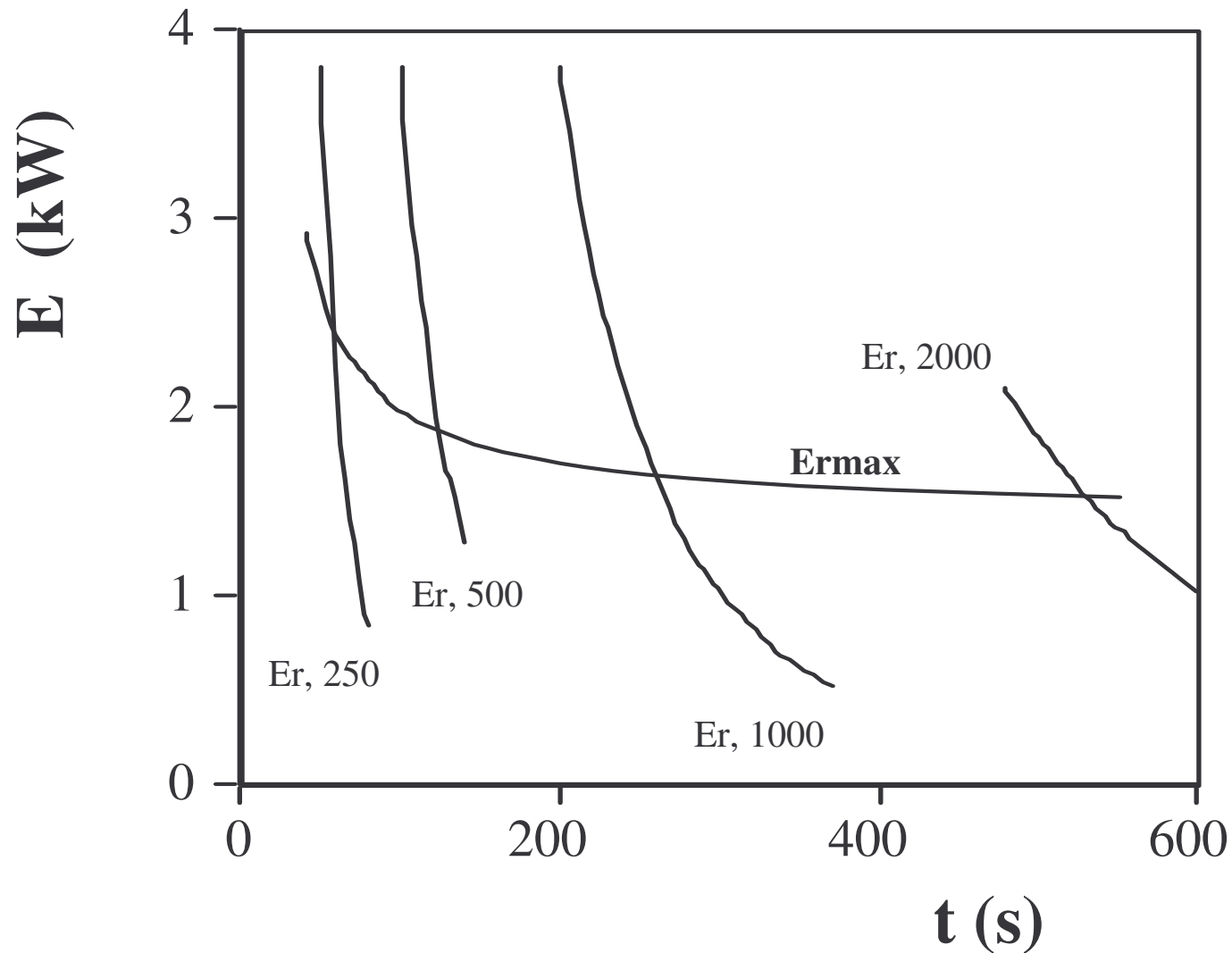


Canottieri, R. Colli et al., 2005

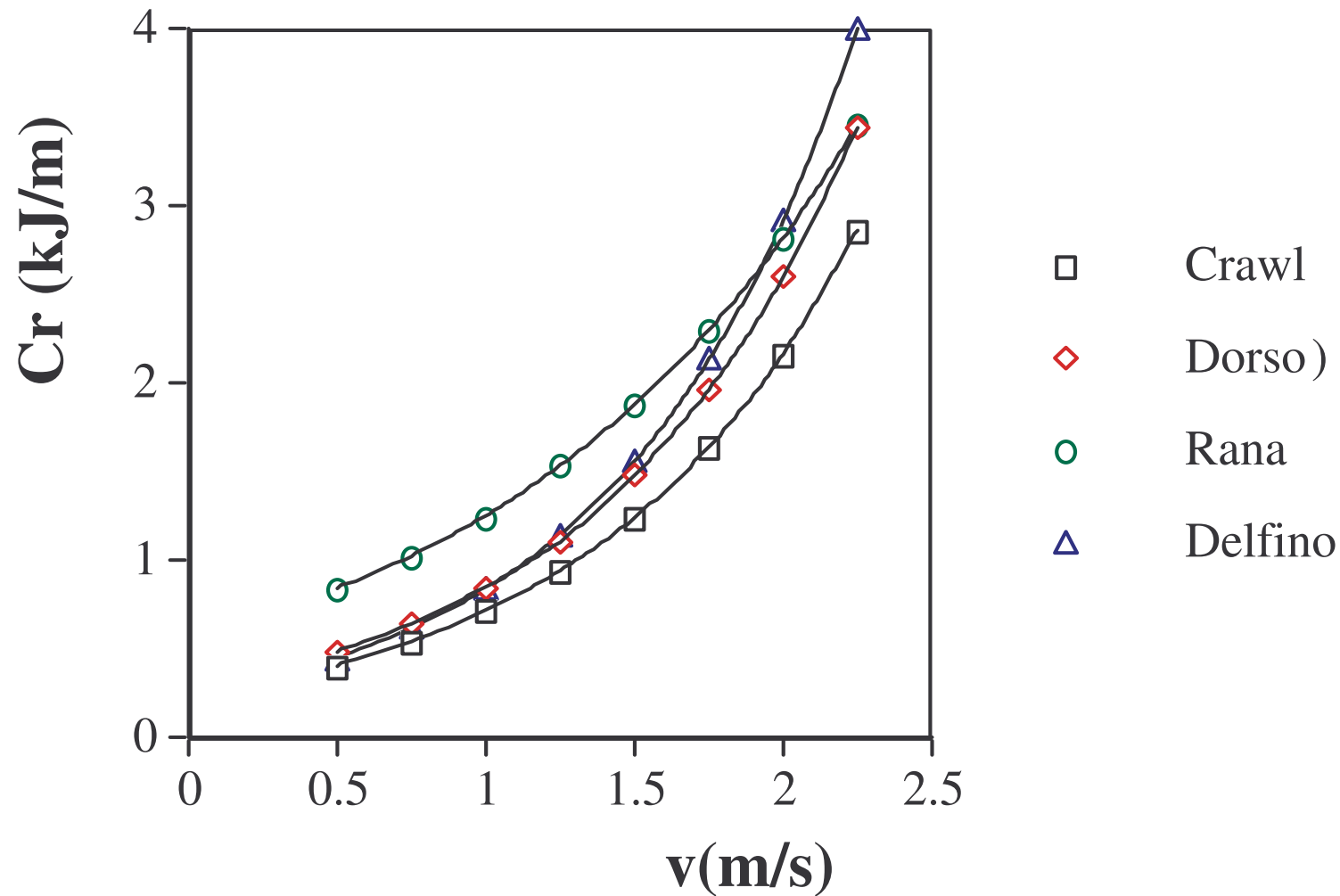
Kayak, P.Zamparo et. al., 1999

Massima potenza metabolica disponibile (E_{max}) e potenza richiesta (E_r) per coprire le distanze indicate nel tempo indicato. (P. Zamparo et al., 1999).

Kayak, ID

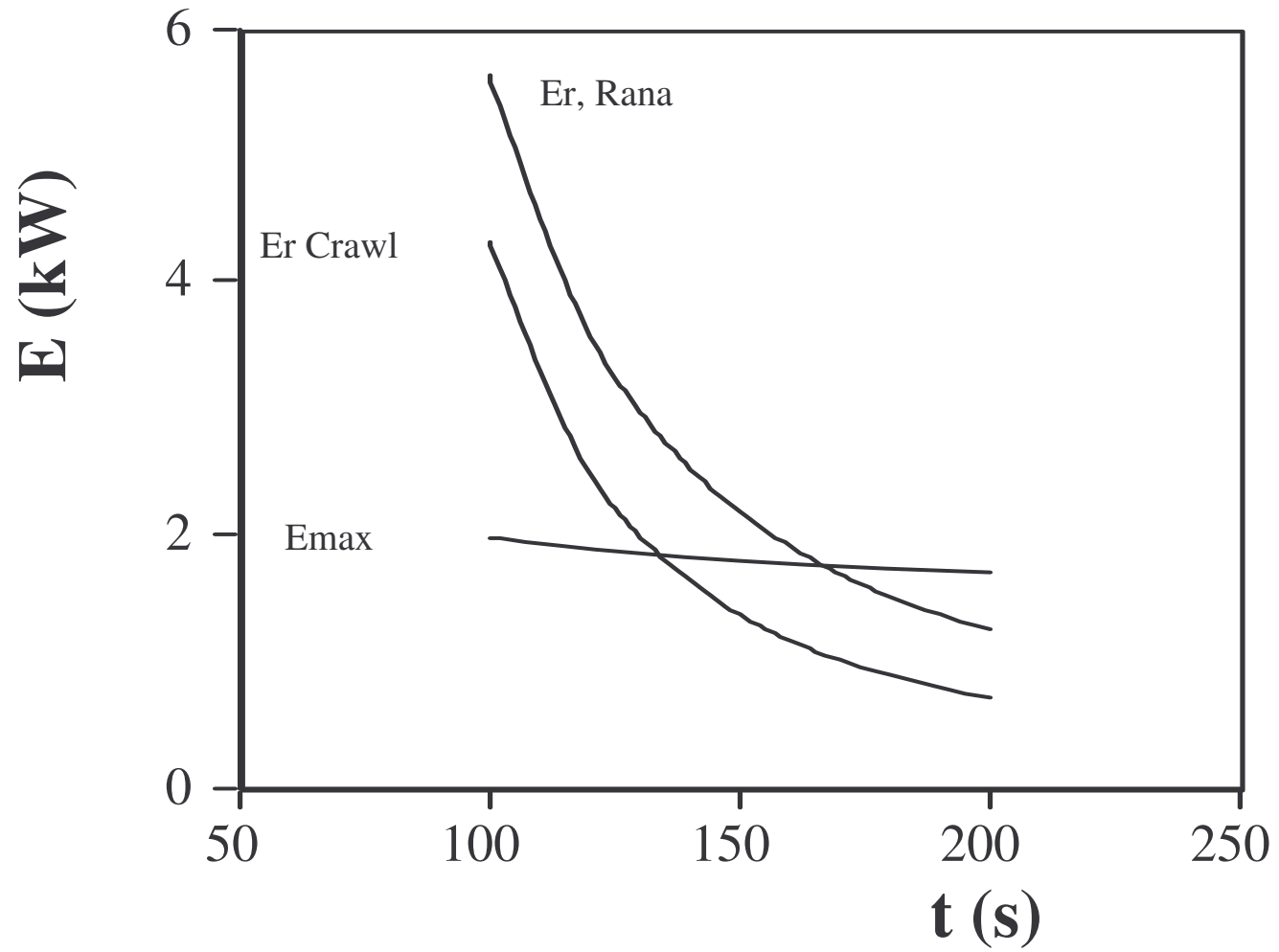


Nuoto (Capelli, 1998)



Nuoto (Capelli, 1998)

200 m



Il **costo energetico per unità di distanza**, può essere determinato a partire da misure del consumo di O₂ allo stato stazionario (ml O₂/min) in condizioni aerobiche ed a velocità (m/min) costante. Il rapporto tra VO₂, al netto del valore di riposo, e velocità è il costo energetico (in ml O₂/m). Si può quindi ricavare una funzione che lega il costo energetico alla velocità (ad es: $C_k = 0,02 v^{2,26}$ per C_k in kJ/m e v in m/s). Ottenuta questa funzione è possibile stimare il costo energetico anche a velocità superiore alla massima aerobica.

La **massima capacità anaerobica** può essere stimata a partire dal pagamento del debito di O₂ lattacido. In questo caso, dal debito totale va sottratto il consumo di O₂ di un eguale periodo di riposo e la componente lenta del debito. In genere è ben approssimata da una funzione lineare del tempo. Al debito lattacido così ottenuto, va aggiunta la componente lattacida, che può essere ottenuta conoscendo la massima concentrazione del lattato ematico (al di sopra del valore di riposo), da che l'incremento di 1 mM di La ematico, in termini energetici, è equivalente al consumo di 3 ml O₂ per kg di massa corporea.

Più complessa è la misura della **costante di tempo** con cui VO₂max viene raggiunto all'inizio del lavoro (τ). Comunque, variazioni anche notevoli di τ introducono errori piuttosto modesti nel calcolo (non superiori al 3 - 5 %).

I valori di E_{max} delle diapositive precedenti sono stati calcolati, per un valore di $\tau = 20$ s, sulla base dei seguenti dati (VO_{2max} netto; 1 kJ = 20.9 litri O_2 ; 1 kW = 2,87 litri O_2 /min):

Canottieri J (valore medio)

$VO_{2max} = 1,72$ kW (4,94 l/min, 78,6 kg); AnS = 86, 5 kJ

Canottieri S (valore medio)

$VO_{2max} = 2,15$ kW (6,17 l/min, 93 kg); AnS = 97,4 kJ

J. Idem

$VO_{2max} = 1,41$ kW (4,04 l/min, 69 kg); AnS = 84,4 kJ

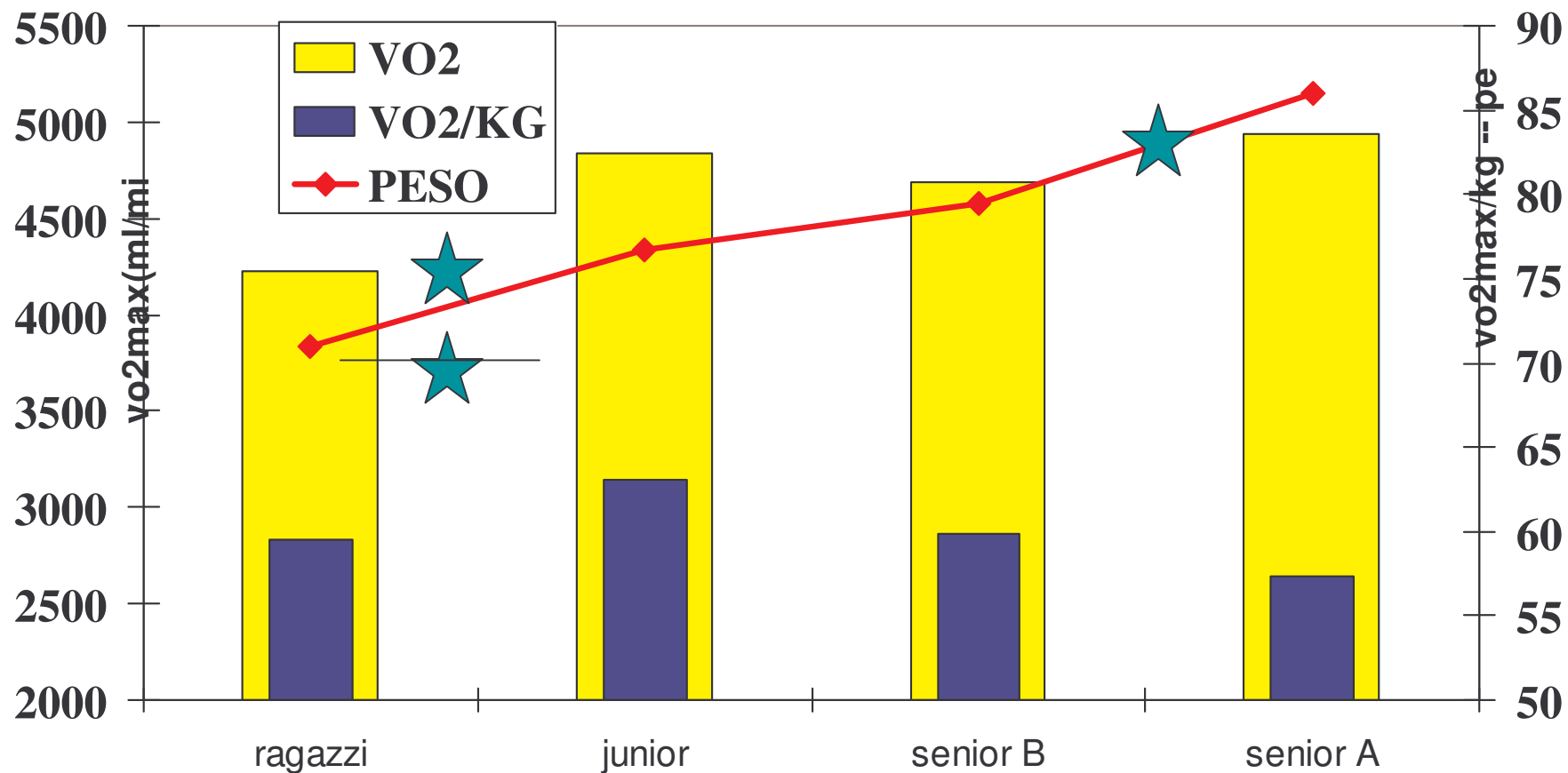
Nuotatori (valore medio)

$VO_{2max} = 1,42$ kW (4,08 l/min, 76,5 kg); AnS = 80.3 5 kJ

I dati presentati nelle diapositive che seguono sono stati ottenuti da Roberto Colli ed Elisabetta Introini della Facoltà di Scienze motorie di Tor Vergata.

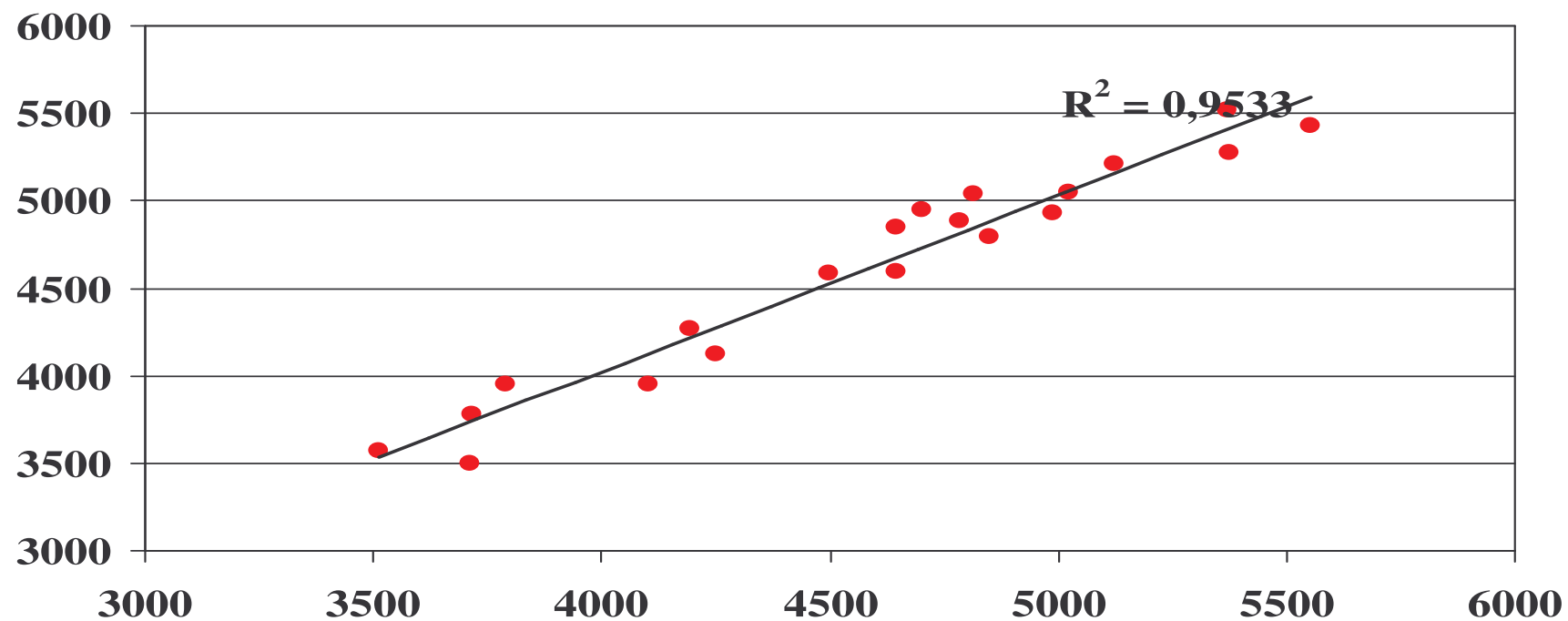
Evoluzione nell'eta del VO2max

La stella indica che il vo2max è Statisticamente significativo tra rag,jun ed il peso con i senior A



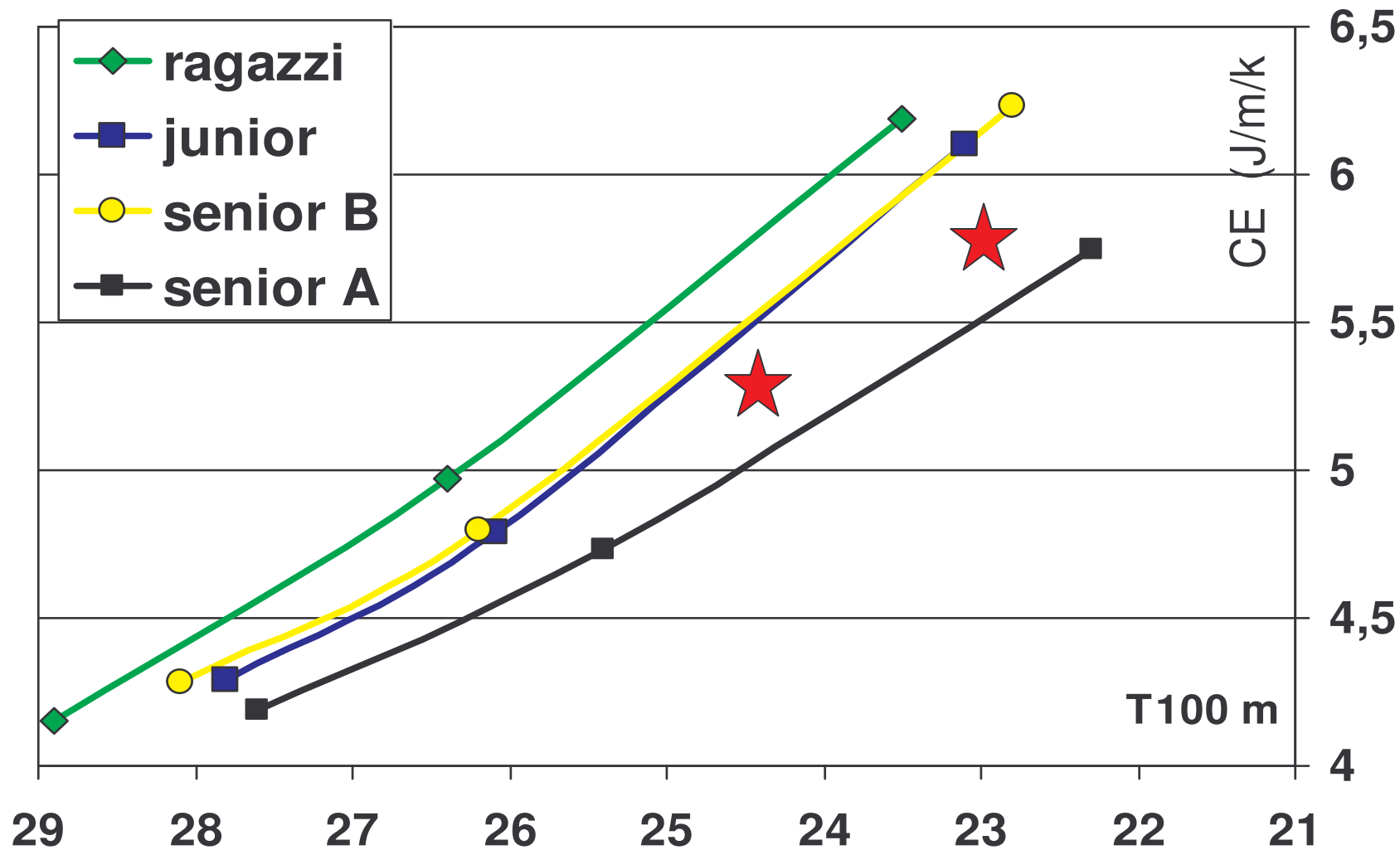
Dai valori in nostro possesso il vo2max dei kajakers di alto livello supera i 5,3-5 l/min ed il valore relativo è compreso tra i 62 e i 70 ml/min/kg

Correlazione tra le prove di 2' ed il test a carichi crescenti

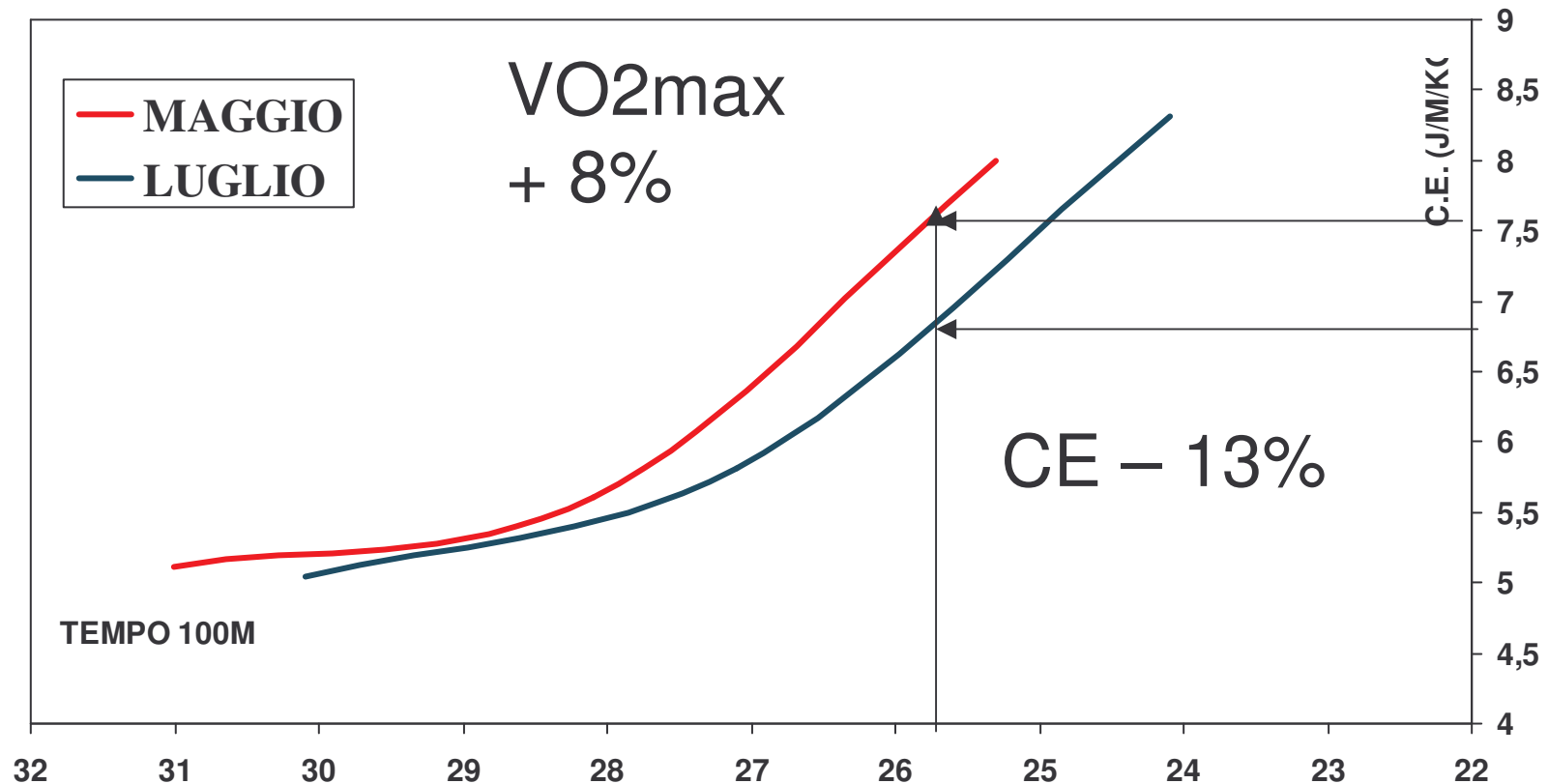


COSTO ENERGETICO DI KAJAKER DI DIVERSA ETA' E LIVELLO

★ $P < 0,05$
Statisticament
e significativo



CONFRONTO C.E. DI UN CANADESE PRIMA E DOPO 2 MESI DI ALLENAMENTO INTERMITTENTE A VEL 27"-23"



**Grazie
per la vostra attenzione**

