



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE**  
Dipartimento di Scienze Mediche e Biologiche  
*P.le M. Kolbe 4 – Udine*

**Progetto:**

**E.M.C.** <sup>0-3000</sup>

**Energetica e meccanica della corsa da 0 a 3000 m**

*Stefano Lazzar, Desy Salvadego, Paolo Taboga, Guglielmo Antonutto  
(mail: stefano.lazzar@uniud.it)*

## INTRODUZIONE

La performance di media e lunga distanza dipende da fattori fisici, fisiologici, metabolici, psicologici e sociali. In particolare, è noto che un notevole peso sulla prestazione finale si deve a:

- alti valori di potenza aerobica ( $V'O_{2max}$ )
- elevata frazione di utilizzo del  $VO_{2max}$  in gara (F)
- ottima economia del gesto, cioè un basso costo energetico della corsa (Cr)

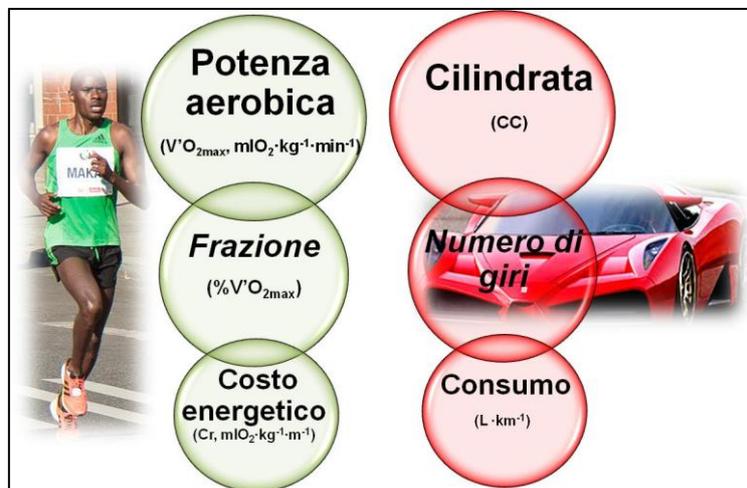
Il  $V'O_{2max}$ , ovvero la massima quantità di  $O_2$  che il nostro organismo è in grado di utilizzare durante un lavoro intenso. Il tempo durante il quale un esercizio aerobico ad intensità costante può essere sostenuto diminuisce all'aumentare della frazione (F) di  $VO_{2max}$  utilizzata durante il lavoro. Il costo energetico (Cr), rappresenta, al netto del basale, è la quantità di energia necessaria a percorrere una distanza unitaria e si esprime in genere in  $kJ/km$  o in  $kcal/km$ . Questi parametri sono legati tra loro dalla relazione:

$$v = F \cdot V'O_{2max} \cdot Cr^{-1} \quad \text{Eq. 1}$$

nella quale  $v$  rappresenta la velocità. E' chiaro che più elevato è il fattore F, a parità di  $V'O_{2max}$ , e più veloce potrà essere il corridore. Di norma si ritiene che F corrisponda alla frazione del  $V'O_{2max}$  corrispondente alla cosiddetta "soglia anaerobica".

Per poter paragonare atleti di taglia diversa, è necessario normalizzare il costo energetico per una dimensione corporea, in genere la massa; molto spesso quindi il costo energetico è espresso in  $kJ \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$  o in  $kcal \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$ . In fisiologia o in medicina il dispendio energetico è calcolato a partire da misure di consumo di  $O_2$ , per cui è spesso pratico esprimere il Cr in  $mLO_2 \cdot Kg^{-1} \cdot m^{-1}$ .

**Figura 1:** Principali fattori che determinano la prestazione in un podista e confronto con i fattori di un'automobile.



La "Supermaratona dell'Etna" è stata una grande occasione per cercare di capire quali siano i principali fattori che determinano le variazioni del costo energetico durante una gara di ultraendurance.

## PROTOCOLLO DELLO STUDIO

La supermaratona ha preso luogo il 16 giugno 2012. Le caratteristiche antropometriche, il costo energetico della corsa (Cr) e la biomeccanica della corsa sono stati misurati prima e dopo la gara.

Il giorno della gara la temperatura variava dai 32°C a livello del mare ai 24° C in corrispondenza dell'arrivo a 3000 m s.l.m. Il terreno della zona etnea si è formato dallo sgretolamento di uno o più tipi di lava di diversa età e da materiali eruttivi quali lapilli, ceneri e sabbie. Lo stato di sgretolamento e la composizione dei materiali eruttivi danno origine a suoli composti, oppure formati da pomice di piccole dimensioni.

## SOGGETTI E METODI

Hanno partecipato alla gara ("Super maratona dell'Etna") sedici atleti di sesso maschile (età compresa tra 23 e 72 anni). In questa sede saranno discussi i risultati dei 14 atleti che hanno terminato la gara.

La *statura* è stata misurata con una precisione di 0,5 cm con un metro a muro standard. La massa corporea (BM) è stata misurata con un'approssimazione a 0,1 kg, con una bilancia manuale (Seca 709, Hamburg, Germany) con i soggetti che indossavano solamente biancheria intima e senza scarpe. L'*indice di massa corporea* (IMC) è stato calcolato dal rapporto tra la massa corporea (MC) e la statura (h) al quadrato ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ):

$$\text{IMC} = \text{MC} \cdot h^{-2} \quad \text{Eq. 2}$$

La *massima potenza aerobica* ( $V'O_2\text{max}$ ) è stata stimata considerando la miglior performance degli atleti realizzata in una maratona prima di questa gara.

Il *costo energetico della corsa* è stato determinato prima e subito dopo la gara, in prossimità dell'arrivo, utilizzando un metabolimetro (Quark-b<sup>2</sup>, Cosmed, Italia) mentre i soggetti correvano per 5-7 minuti ad una velocità costante e scelta liberamente.

*Analisi biomeccanica.* Ogni soggetto è stato filmato prima e subito dopo la gara con una videocamera (Nikon J1, Giappone) con una frequenza di acquisizione di 400 frame/s, posta perpendicolarmente alla linea di corsa del soggetto. I video sono stati analizzati con l'utilizzo del software Kinovea (0.8.15 – Joan Charmant & Contrib.) per la misura dei tempi di contatto ( $t_c$ , s) e di volo ( $t_v$ , s) della corsa dei soggetti.

Per ogni soggetto sono stati presi in considerazione 5 passi ed i valori medi di  $t_c$  e  $t_v$  sono stati ritenuti per calcoli successivi, come anche la lunghezza della gamba (L, m) dal grande trocantere al suolo e la velocità di corsa (m/s). Sono quindi stati calcolati:

- la frequenza del passo (f, Hz):

$$f = \frac{1}{(t_v + t_c)}$$

- la forza massima di reazione al suolo ( $F_{max}$ , N) ovvero la massima forza sviluppata sul terreno nella fase di appoggio:

$$F_{max} = mg \frac{\pi}{2} \left( \frac{t_v}{t_c} + 1 \right)$$

- la variazione del centro di massa ( $\Delta z$ , m) ovvero l'oscillazione verticale del corpo nella fase di appoggio:

$$\Delta z = - \frac{F_{max}}{m} \frac{t_c^2}{\pi^2} + g \frac{t_c^2}{8}$$

- La compressione verticale della gamba ( $\Delta L$ , m) ovvero la flessione dell'arto inferiore nella fase di appoggio:

$$\Delta L = L - \sqrt{L^2 - \left(\frac{vt_c}{2}\right)^2} + \Delta z$$

- la stiffness verticale (Kvert, KN/m) ovvero l'elasticità del corpo del soggetto:

$$k_{vert} = \frac{F_{max}}{\Delta z}$$

- la stiffness della gamba (Kleg, KN/m) ovvero l'elasticità del solo arto inferiore del soggetto:

$$k_{leg} = \frac{F_{max}}{\Delta L}$$

La massima potenza degli arti inferiori è stata determinata a partire dalla misura dei tempi di spinta e di volo durante un salto a piedi pari.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

Le caratteristiche fisiche dei 14 soggetti esaminati sono riportati nella **tabella 1**. Sono stati indicati i valori riguardanti l'età media, la massa corporea, la statura, l'indice di massa corporea (IMC), la lunghezza della gamba e la massima potenza aerobica degli atleti.

**Tabella 1.** Caratteristiche fisiche degli atleti:

	N° soggetti 14	
Età (anni)	45,8 ± 13,1	[ 27,0 – 72,0 ]
Massa corporea (kg)	69,6 ± 10,3	[ 55,0 – 88,0 ]
Statura (m)	1,80 ± 0,10	[ 1,63 – 1,85 ]
IMC (kg · m <sup>-2</sup> )	22,5 ± 2,5	[ 19,0 – 27,4 ]
L (m)	0,89 ± 0,04	[ 0,81 – 0,94 ]
V'O <sub>2</sub> max (mLO <sub>2</sub> · kg <sup>-1</sup> · m <sup>-1</sup> )	47,7 ± 8,3	[ 37,9 – 61,5 ]

*Tutti i valori sono espressi in media ± 1 deviazione standard.*

*IMC: indice massa corporea; L: lunghezza della gamba; V'O<sub>2</sub>max: massima potenza aerobica.*

*I valori minimo e massimo sono presentati tra le parentesi quadre.*

Il valore medio della massima potenza aerobica consente di affermare che si trattava di soggetti mediamente allenati considerando anche l'elevato range di età. Gli atleti percorrevano in media 68,7 km · settimana<sup>-1</sup> e partecipavano a gare di endurance in media da 9,7 anni e ultraendurance da 5,9 anni.

I dati riportati nella **tabella 2**, mostrano come al termine della gara la bioenergetica e la biomeccanica della corsa peggiorino. Si osserva infatti un aumento significativo:

- del costo energetico del 17,9 %,
- del tempo di contatto al suolo (tc) del 34,1%
- dello spostamento del centro di massa (Δz) del 64,2%.

E, al contrario, un calo significativo:

- della velocità di corsa durante il test del 34,2%,
- del tempo di volo del 65,6%.
- della frequenza del passo del 13,0%
- della forza di reazione al suolo del 18,7%
- della stiffness verticale (Kvert) del 49,6 %
- della stiffness della gamba (Kleg) del 20,7 %

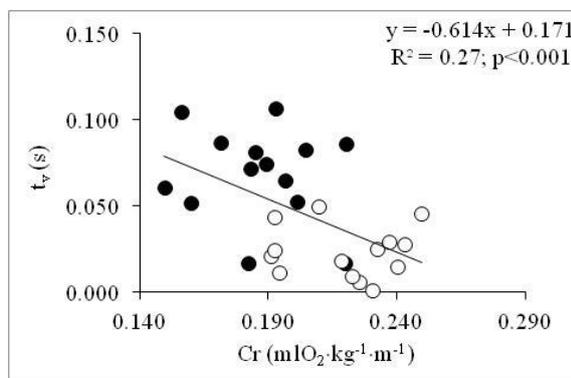
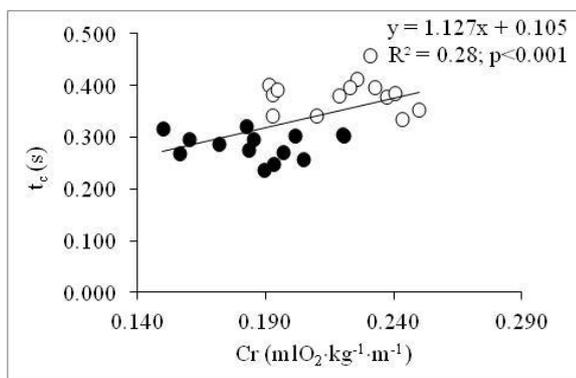
**Tabella 2:** Dati metabolici e biomeccanici prima e dopo la gara

	Pre-gara	Post-gara	Variazione %	p
Massa corporea (kg)	69,9 ± 11,0	66,9 ± 9,5	-4,2	0,002
Cr (mlO <sub>2</sub> /(kg m))	0,187 ± 0,022	0,220 ± 0,021	<b>+17,9</b>	0,008
velocità (m/s)	3,51 ± 0,42	2,31 ± 0,39	-34,2	0,001
tc (s)	0,285 ± 0,026	0,383 ± 0,033	+34,1	0,001
tv (s)	0,069 ± 0,027	0,024 ± 0,015	-65,6	0,001
f (Hz)	2,84 ± 0,19	2,47 ± 0,13	-13,0	0,001
Fmax (N)	1338,8 ± 214,5	1096,9 ± 157,4	-18,1	0,001
Δz (m)	0,065 ± 0,009	0,106 ± 0,016	+64,2	0,001
ΔL (m)	0,219 ± 0,031	0,224 ± 0,037	+2,4	0,632
kvert (KN/m)	20,99 ± 3,78	10,58 ± 2,28	-49,6	0,001
kleg (KN/m)	6,29 ± 1,59	4,99 ± 0,94	-20,7	0,002

Cr: costo energetico della corsa; tc: tempo di contatto; tv: tempo di volo; f: frequenza del passo; Fmax: forza massima di reazione al suolo; Δz: variazione del centro di massa; ΔL: compressione verticale della gamba; Kvert: stiffness verticale; Kleg: stiffness della gamba.

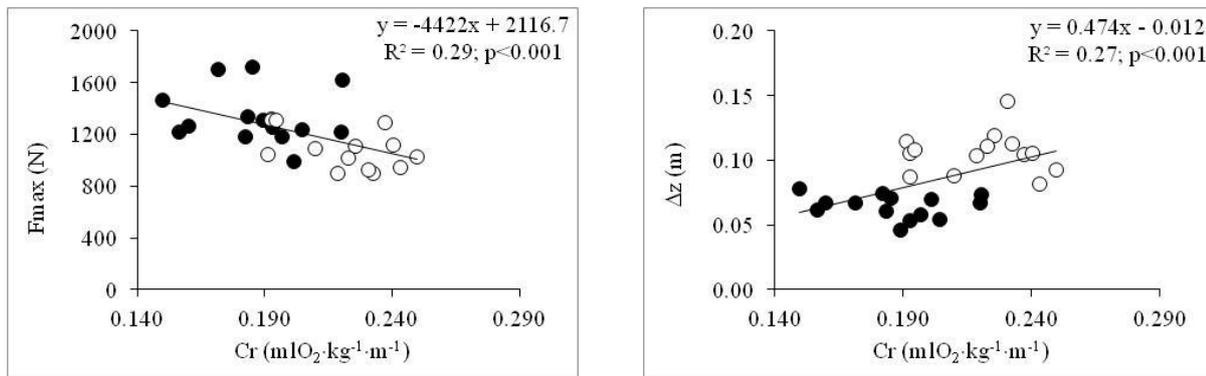
In particolare, si è osservato come un aumento del costo energetico (Cr) della corsa sia correlato ad un aumento del tempo di contatto ed ad una diminuzione del tempo di volo (fig. 2).

**Figura 2:** Relazione tra tempo di contatto (tc) e tempo di volo (tv) con il costo energetico della corsa (Cr) misurati prima (●) e dopo la gara (○).



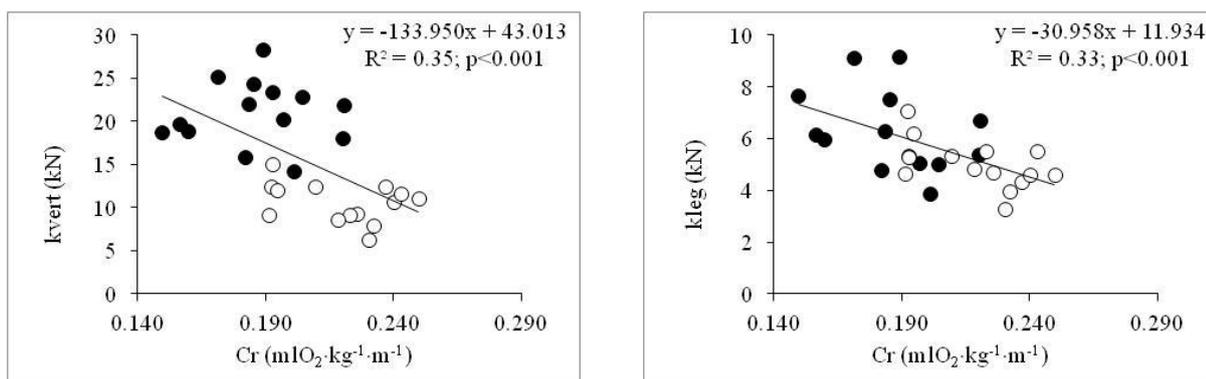
L'aumento del costo energetico della corsa risultava essere correlato significativamente ad una diminuzione della forza massima di reazione al suolo (Fmax) e ad un aumento delle oscillazioni verticali del centro di massa(Δz) (fig. 3).

**Figura 3:** Relazione tra forza massima di reazione al suolo ( $F_{max}$ ) e spostamento verticale del centro di massa ( $\Delta z$ ) in funzione del costo energetico della corsa, misurati prima ( $\bullet$ ) e dopo la gara ( $\circ$ ).



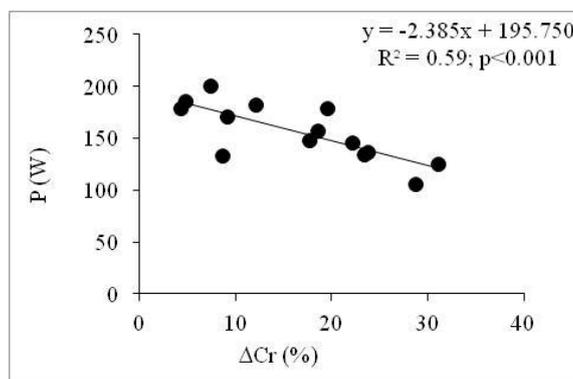
Inoltre, l'aumento del costo energetico della corsa risultava essere correlato significativamente ad una diminuzione della stiffness verticale ( $K_{vert}$ ) e della compressione della gamba ( $K_{leg}$ ) (fig. 4).

**Figura 4:** Relazione tra stiffness verticale ( $K_{vert}$ ) e compressione della gamba ( $K_{leg}$ ) in funzione del costo energetico della corsa, misurati prima ( $\bullet$ ) e dopo la gara ( $\circ$ ).



Infine, si è potuto osservare come il maggior aumento del costo energetico della corsa risultasse correlato a quei soggetti che esprimevano meno potenza degli arti inferiori (fig. 5) all'inizio della gara.

**Figura 5:** Relazione tra potenza degli arti inferiori ( $P$ ) e variazione del costo energetico della corsa ( $\Delta Cr$ ).



## **CONCLUSIONI**

Si può constatare come in una gara di ultraendurance, il costo energetico della corsa aumenti per effetto di un peggioramento della meccanica di corsa dei soggetti. In particolare, si è osservato un aumento significativo del tempo di contatto e dello spostamento verticale del centro di massa; una diminuzione del tempo di volo, della frequenza del passo, della forza massima di reazione al suolo, della stiffness verticale e della stiffness della gamba. Si tratta di modificazioni della biomeccanica della corsa che, combinate tra loro, portano coerentemente ad un peggioramento significativo del costo energetico della corsa (Cr) osservato alla fine della gara.

Inoltre, si è potuto osservare come il maggior aumento del costo energetico della corsa si sia verificato in quei soggetti che esprimevano meno potenza degli arti inferiori (Fig. 5) già all'inizio della gara. Questi dati suggeriscono che la causa del peggioramento del Cr della corsa vada identificata nella minor stabilità della muscolatura della gamba. Sembrerebbe pertanto indicato, per gli atleti di endurance che competono in gare simili alla Supermatatona dell'Etna, inserire nel programma di allenamento delle sedute volte ad allenare la potenza degli arti inferiori e ad aumentarne la stabilità.

## **RINGRAZIAMENTI**

Si ringraziano tutti gli atleti per aver aderito al progetto e l'Unione Sportiva Mario Tosi –Tarvisio, in particolare il Sig. M. Malfitana ed il Sig. E. Bertolissi, per aver ideato e organizzato questa splendida manifestazione.