

Bioenergetica della corsa sprint

Fisiologia della prestazione sportiva

Università degli Studi di Verona
Scienze Motorie
aa 2012-1013

*Sprint running: a new energetic approach di Prampero
PE et al. J Exp Biol 208: 2809-2816, 2005*

C

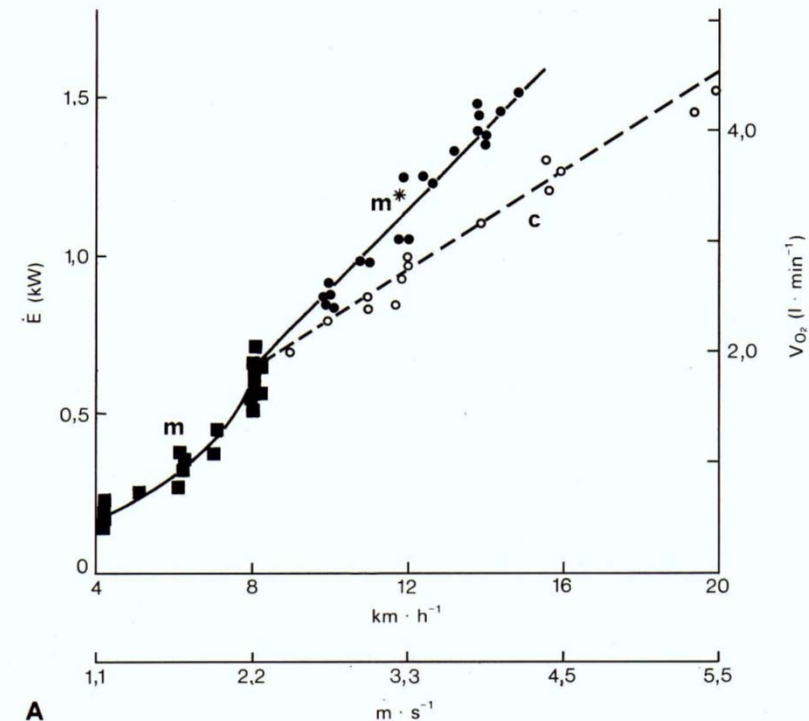
Per definizione il costo energetico è la quantità di energia spesa per unità di distanza

simbolo **C**,

Unità: kJ/km; J/(kg m)

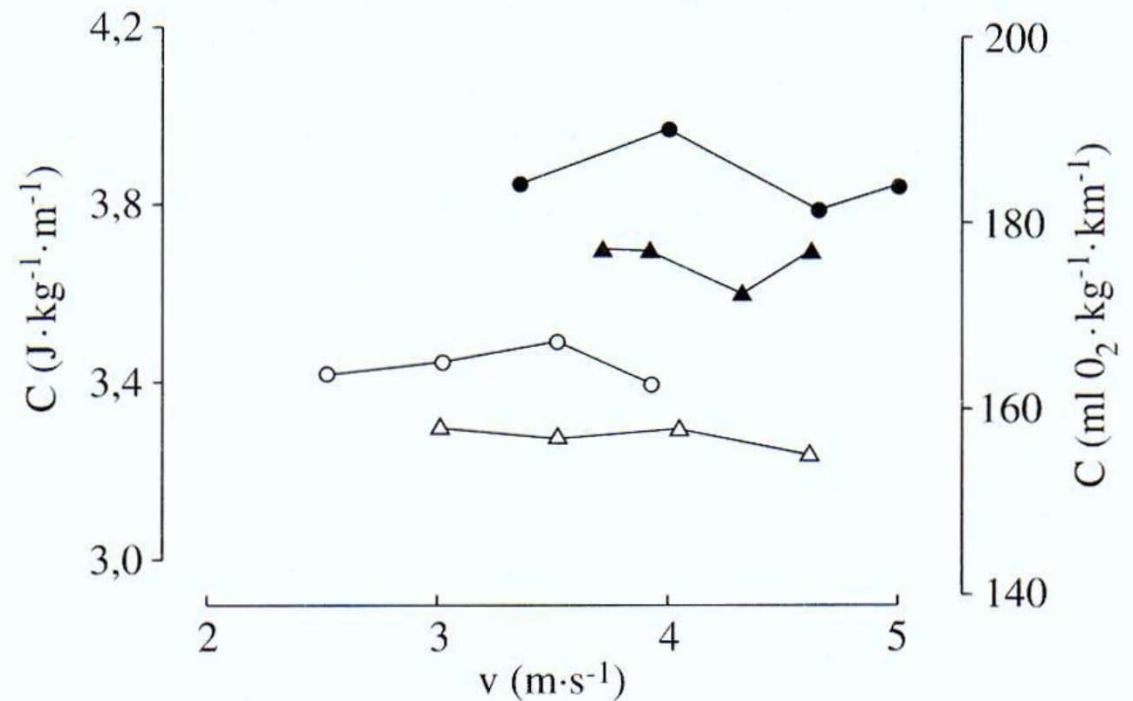
[1 litro O₂ $\approx$ 5 kcal $\approx$ 21 kJ]

Il costo energetico della locomozione (marcia naturale, m; marcia agonistica, m*; corsa, c), ad ogni velocità è il rapporto tra ordinata (potenza metabolica al di sopra del valore di riposo) e ascissa (velocità)

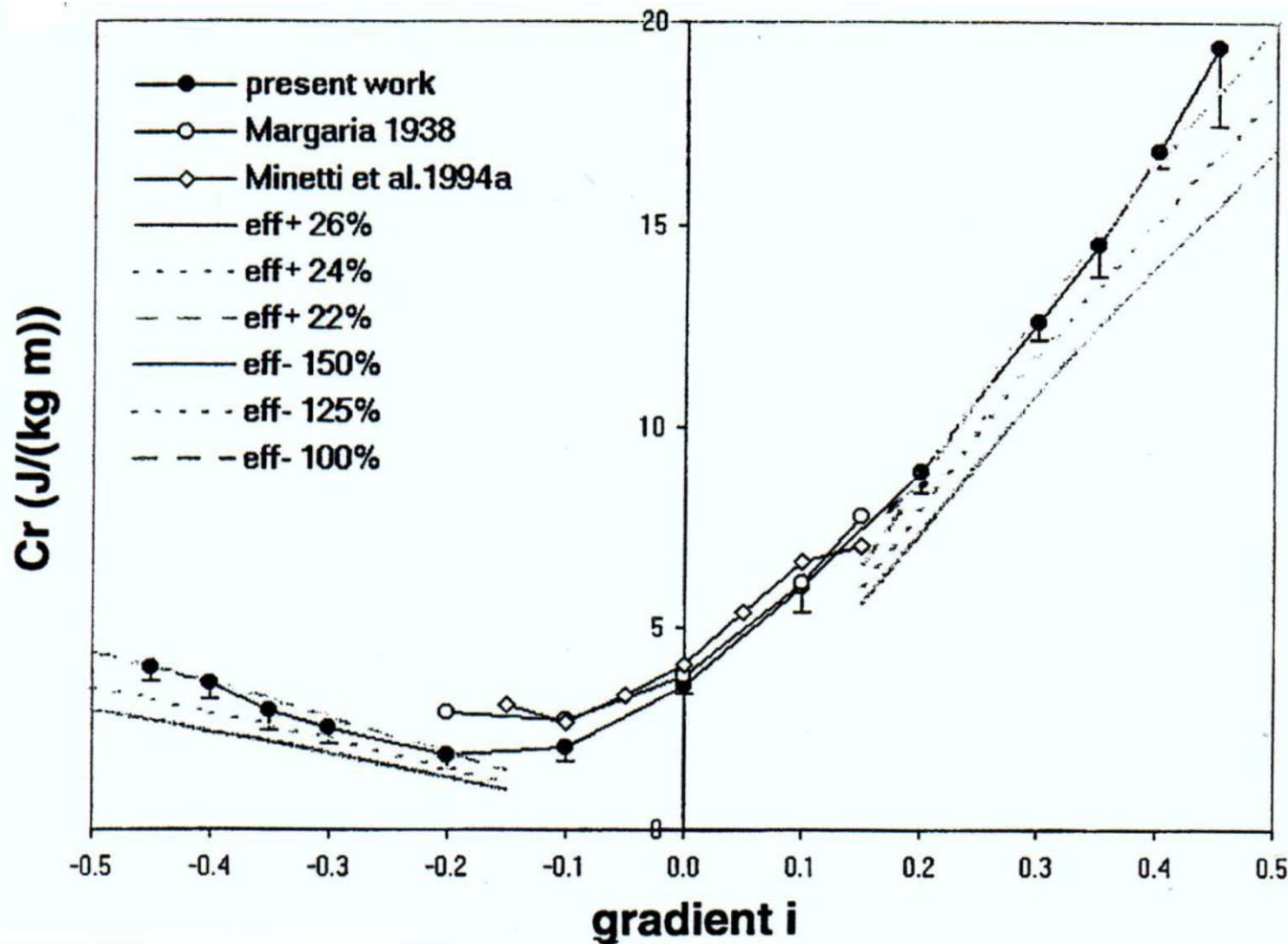


Il costo energetico della corsa (C) a velocità costante è indipendente dalla velocità perché la funzione :

potenza metabolica
netta/velocità è una retta
che passa per l'origine
delle coordinate.



ECr in salita-discesa



Durante la corsa in salita o in discesa a velocità costante, Cr è indipendente dalla velocità. Tuttavia, rispetto alla corsa in piano, Cr aumenta in salita e diminuisce in discesa, fino a una pendenza del -20 % circa, per poi aumentare leggermente (Minetti et al., 2002).

$$ECr (J \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-1}) = 155.4 x^5 - 30.4 x^4 - 43.3 x^3 + 46.3 x^2 + 19.5 x + 3.6$$

$$Cr \cdot v = E'r$$

$$[\text{ml O}_2/\text{m} \cdot \text{m}/\text{min} = \text{mlO}_2/\text{min}]$$

La la **potenza metabolica** ($E'r$),
ossia l'energia spesa
per unità di tempo, è
il prodotto del Costo
energetico (Cr) per la
velocità di corsa (v):

da cui :

$$v = E'r / Cr$$

$$v_{\text{max}} = E'r_{\text{max}} / Cr$$

In condizioni aerobiche

-

$$\text{max velocità aerobica} = \frac{F \cdot V'O_{2\max}}{C}$$

V'O_{2max}: massimo consumo di ossigeno.

F: massima frazione di V'O_{2max} sostenibile per tutta la durata della prestazione.

Cr: costo energetico della corsa.

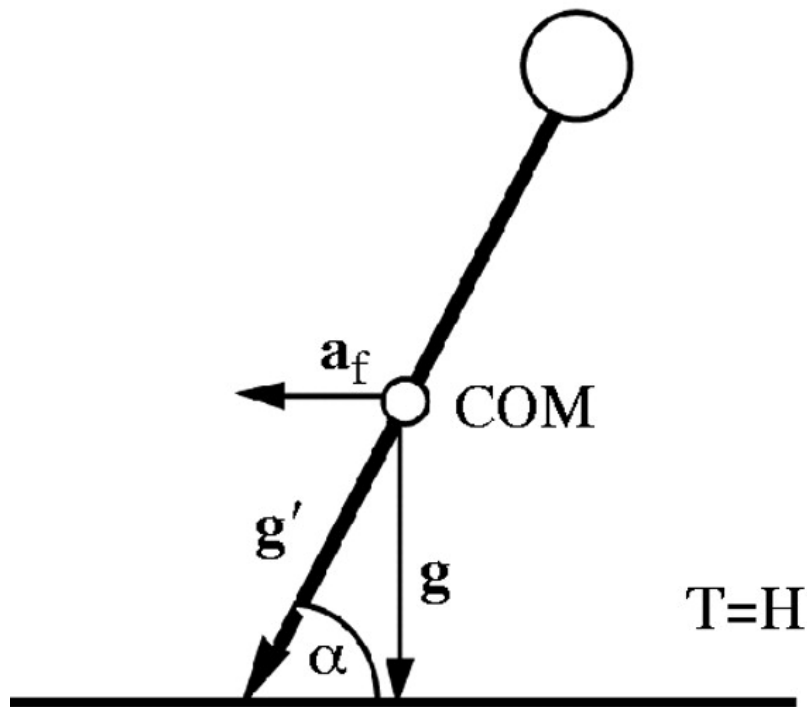
Questa equazione spiega oltre il 90 % della variabilità delle prestazioni individuali nella corsa su distanze dai 5000 metri alla maratona (P .E. di Prampero et al., Eur. J. Appl. Physiol. 1986; J. Appl. Physiol. 1993).

1. Il costo energetico della corsa in accelerazione è maggiore di quello a velocità costante perché il soggetto deve spendere energia anche per aumentare la propria energia cinetica.
2. Dal punto di vista biomeccanico, in prima approssimazione, la corsa in piano in accelerazione è equivalente alla corsa in salita a velocità costante.

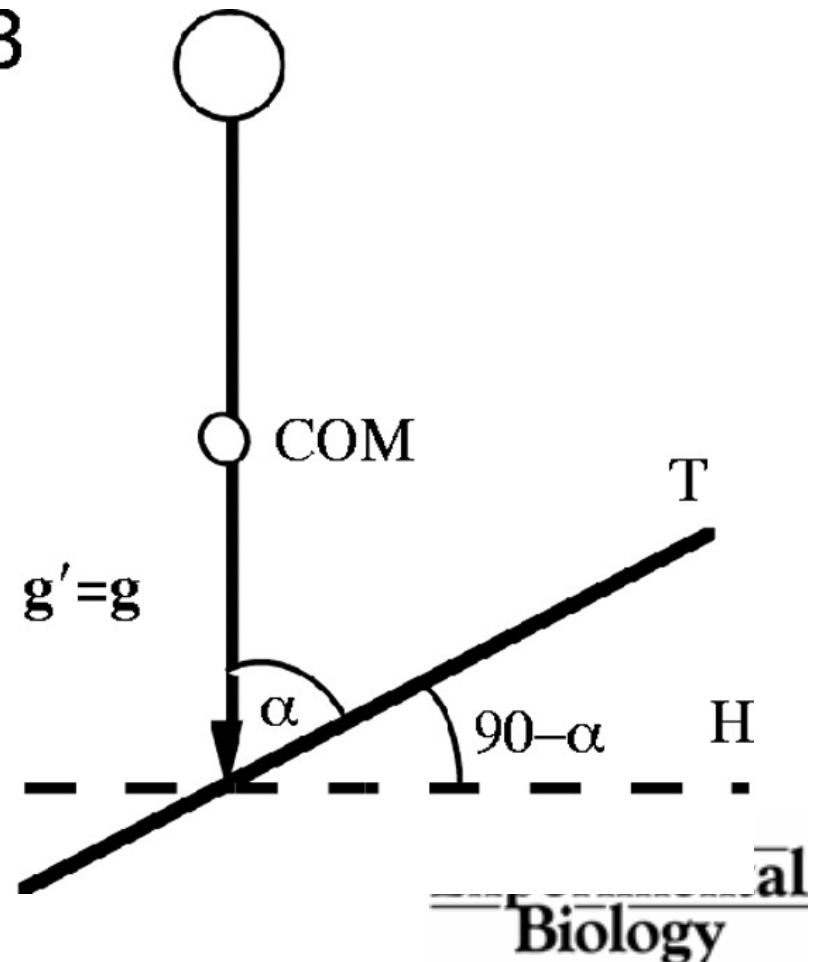
Simplified view of the forces acting on a runner.

Il soggetto accelera durante corsa in piano (a) o corre in salita a velocità costante (b). M , massa corporea ; a_f , accelerazione antero-posteriore; g , accelerazione di gravità; $g' = \sqrt{a_f^2 + g^2}$, somma vettoriale di a_f e g ; T , terreno; H , orizzontale; α , angolo tra il corpo del corridore e T ; $90 - \alpha$, angolo tra T e H .

A

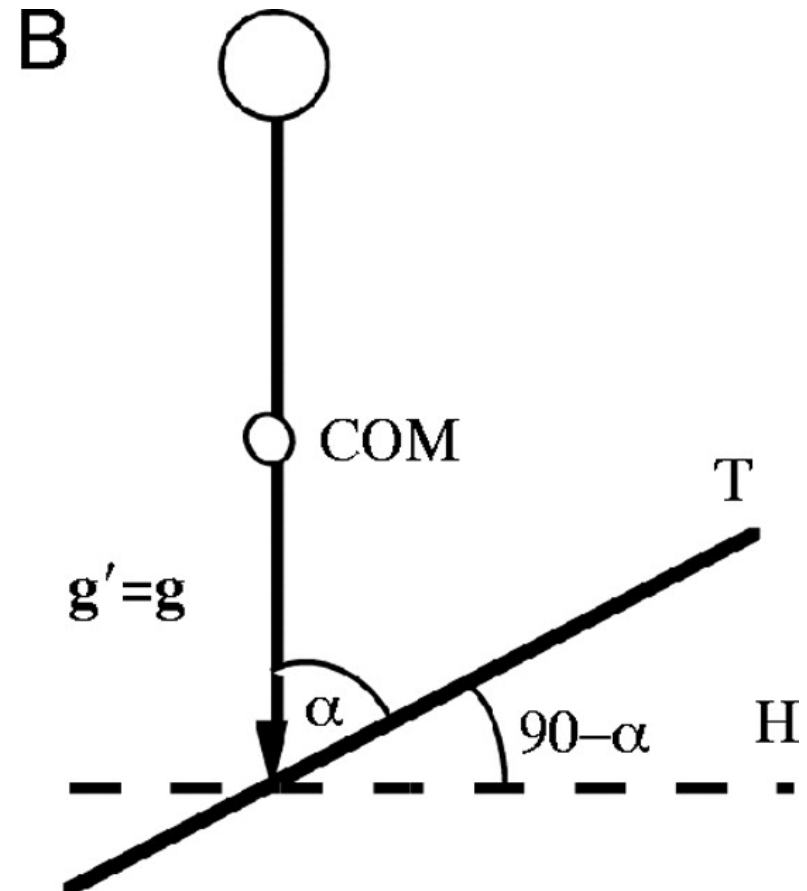
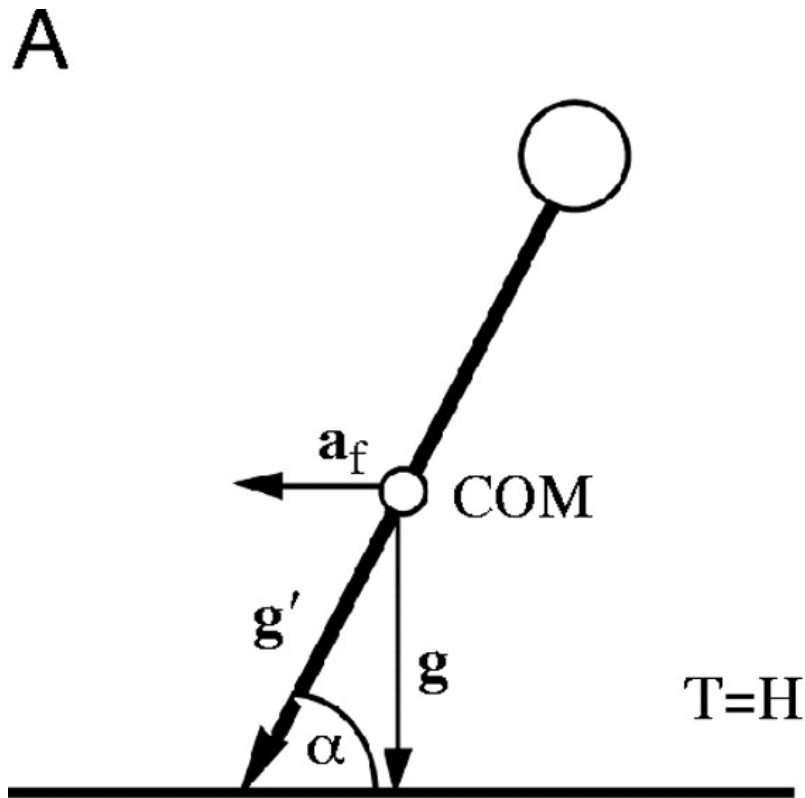


B

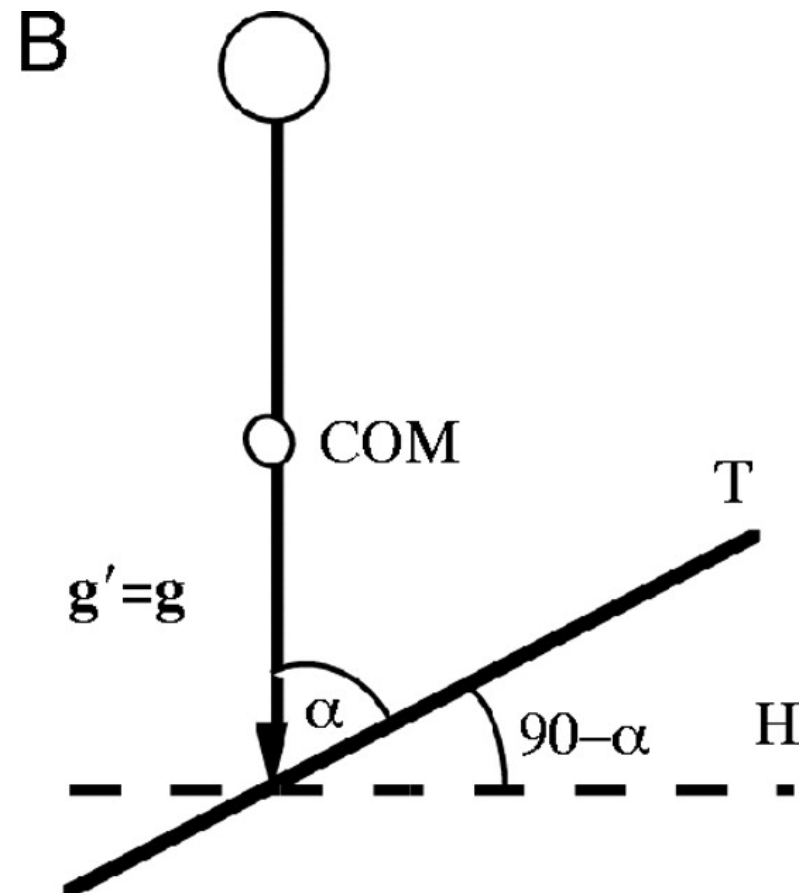
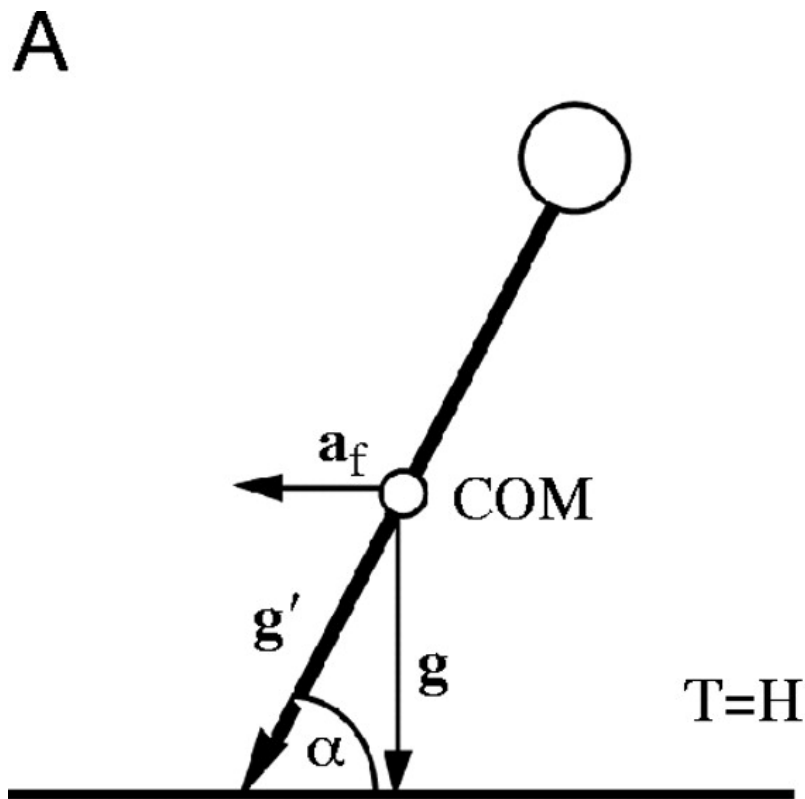


Data l'equivalenza geometrica delle due situazioni, la corsa in accelerazione (a) è equivalente alla corsa in salita (b) ad una pendenza (angolo $90 - \alpha$) determinata dall'accelerazione stessa. Definiamo ES (Equivalent Slope) la "pendenza equivalente". Esprimendo l'inclinazione del terreno in percentuale:

$$ES = [\operatorname{tg} (90 - \alpha)] * 100 = (a_f/g) * 100$$



Inoltre, g' è sempre maggiore di g . Il soggetto che corre in accelerazione (a) è sottoposto quindi a una forza peso maggiore di quando è fermo o corre a velocità costante, come se la sua massa corporea fosse incrementata di un fattore eguale a g'/g . Definiamo questo fattore “massa equivalente” (EM). Poiché $g' = \sqrt{a^2 + g^2}$, $EM = \sqrt{a^2 + g^2}/g$.

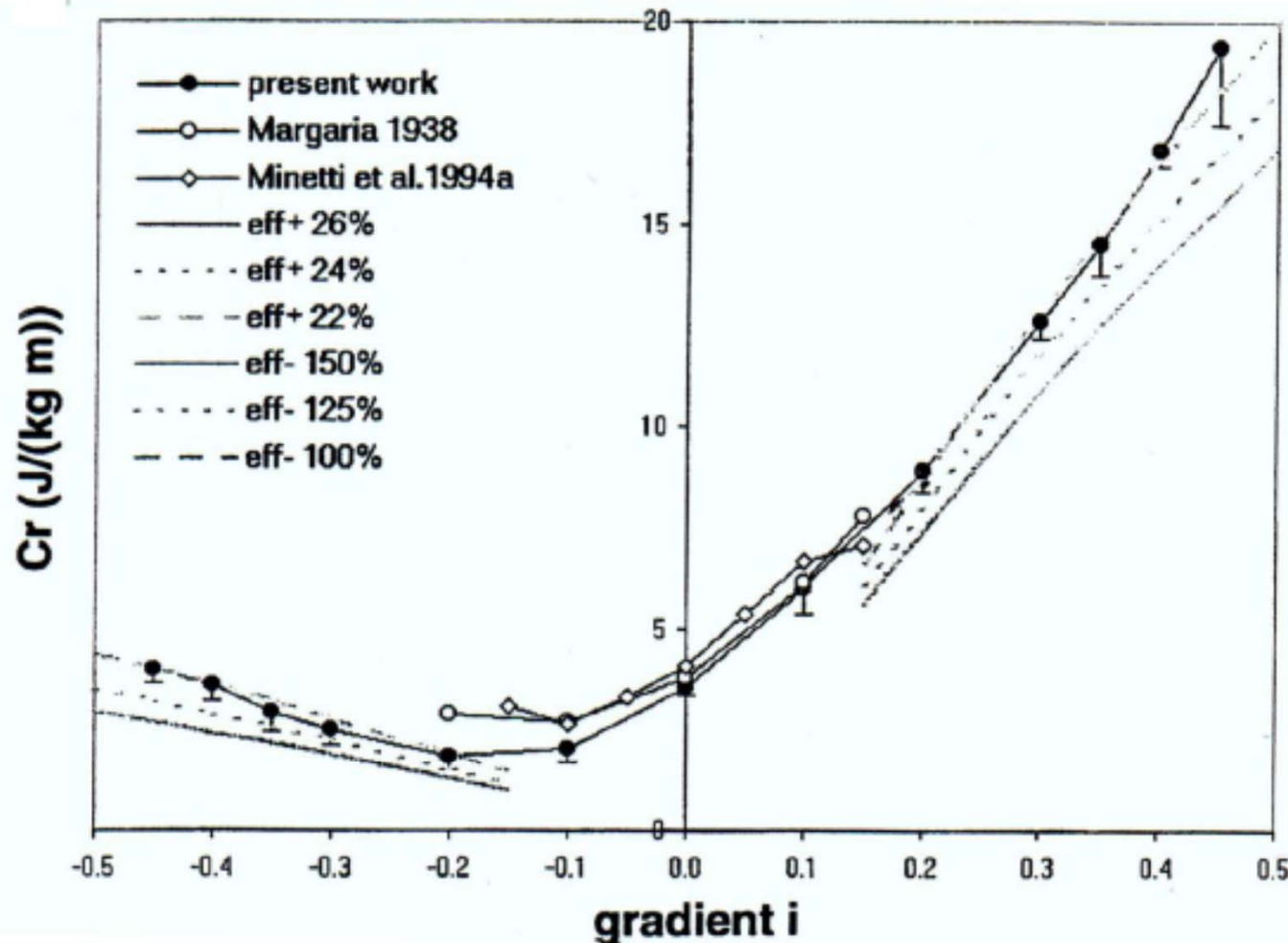


Misurando l'andamento della velocità in funzione del tempo è possibile calcolare l'accelerazione antero-posteriore, e quindi pendenza e massa equivalenti

$$(ES = (a_f/g) * 100 \text{ ed } EM = \sqrt{a_f^2 + g^2}/g).$$

Poiché inoltre il costo energetico della corsa a velocità costante in salita è ben noto dalla letteratura (Margaria, 1938; Margaria et al., 1963; Minetti et al., 1994; 2002), è possibile risalire da ES ed EM al corrispondente costo energetico.

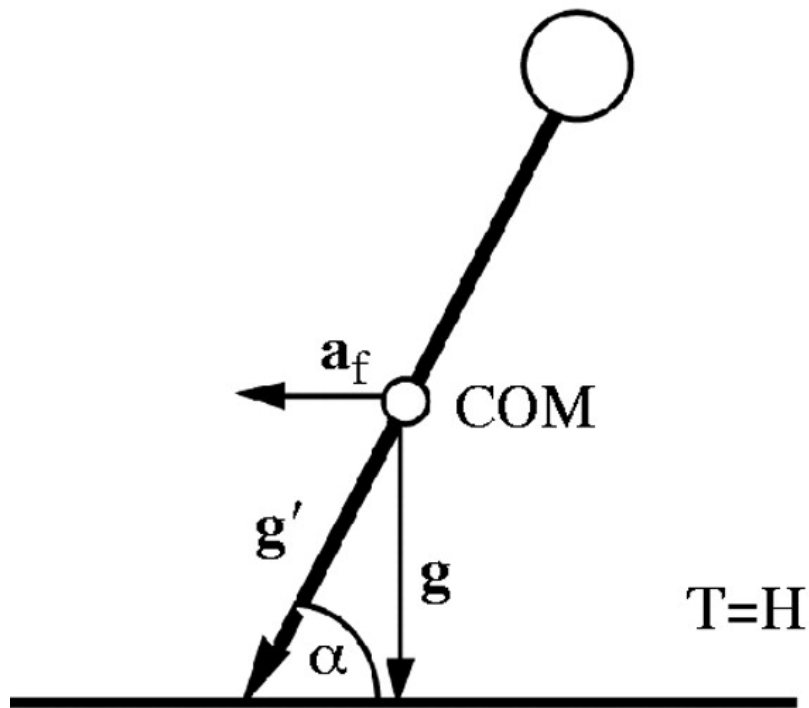
$Cr \text{ (J/(kg m))} = 155.4 i^5 - 30.4 i^4 - 43.3 i^3 + 46.3 i^2 + 19.5 i + 3.6$
 (i = inclinazione % del terreno) (Minetti et al., 2002), dove
 3,6 è il costo a velocità costante in piano e l'effetto della
 pendenza è dato dalla somma dei termini che contengono i.



Sostituendo i con **ES** e moltiplicando il tutto per **EM** è possibile stimare il costo della corsa in accelerazione.

Sprint running: teoria

A



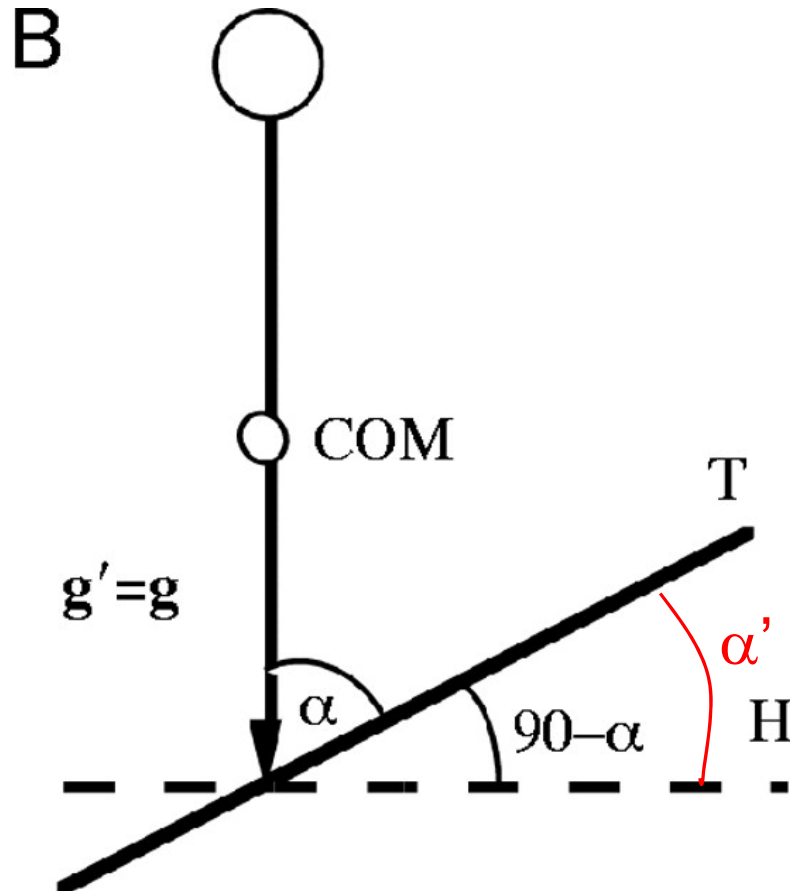
- Accelerazione totale g'

- $g' = (a_f^2 + g^2)^{0.5}$

$\alpha = \arctan g/a_f$

- Questa condizione è analoga a quella di un soggetto che corra in salita a velocità costante
- In questo caso, l'accelerazione totale g' agisce in verticale

Sprint running: teoria



$$\alpha' = (90 - \alpha) = 90 - \arctan \mathbf{g}/\mathbf{a}_f$$

- *Equivalent Slope (ES)* corrispondente all'angolo α'

$$ES = \tan (90 - \arctan \mathbf{g}/\mathbf{a}_f)$$

- Forza media durante l'intero ciclo del passo o *Equivalent body weight* $\mathbf{F}'$

$$\mathbf{F}' = M_b \mathbf{g}'$$

- A velocità costante: $\mathbf{F} = M_b \mathbf{g}$
- **EM**: *equivalent normalised body mass*: rappresenta un sovraccarico imposto sull'atleta dall'accelerazione

$$EM = \mathbf{F}' / \mathbf{F} = \mathbf{g}' / \mathbf{g} = (\mathbf{a}_f^2 / \mathbf{g}^2 + 1)^{0.5}$$

Sprint running: teoria

La corsa sprint può essere considerata equivalente alla corsa a velocità costante sulla Terra effettuata:

- ad una pendenza equivalente ES
- Trasportando una massa addizionale $\Delta M = M_b (\mathbf{g}'/\mathbf{g}^{-1})$ in modo tale che la massa totale $EM = \Delta M + M_b$

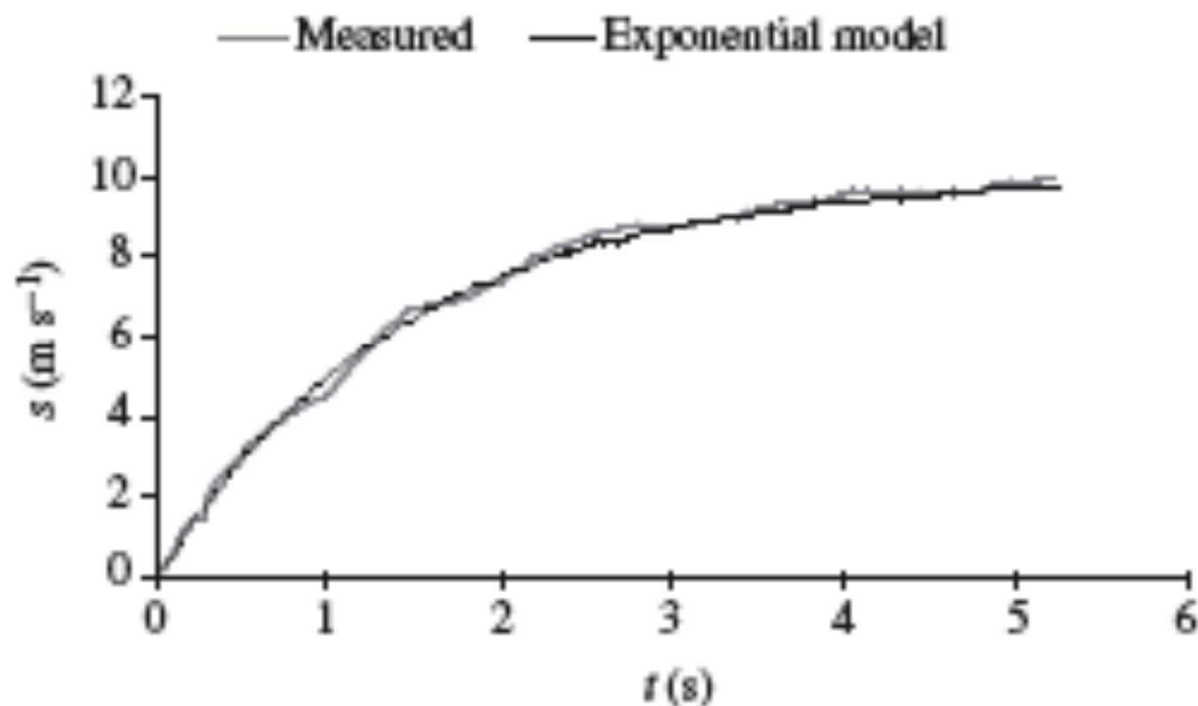
ES e **EM** possono essere calcolate se si misura $\mathbf{a}_f$ (l'accelerazione in avanti) poiché dipendono solo da essa

ESPERIMENTI è stata determinata la velocità nel corso dei primi 30 m di uno sprint di 100 m piani su 12 atleti maschi.

Caratteristiche dei soggetti e migliori prestazioni sui 100 m piani nella stessa stagione.

	Età (anni)	Massa (kg)	Statura (m)	miglior tempo (s)
Media	21.0	74.2	1.80	11.30
DS	2.7	7.0	0.06	0.35

Velocità, accelerazione a_f e d

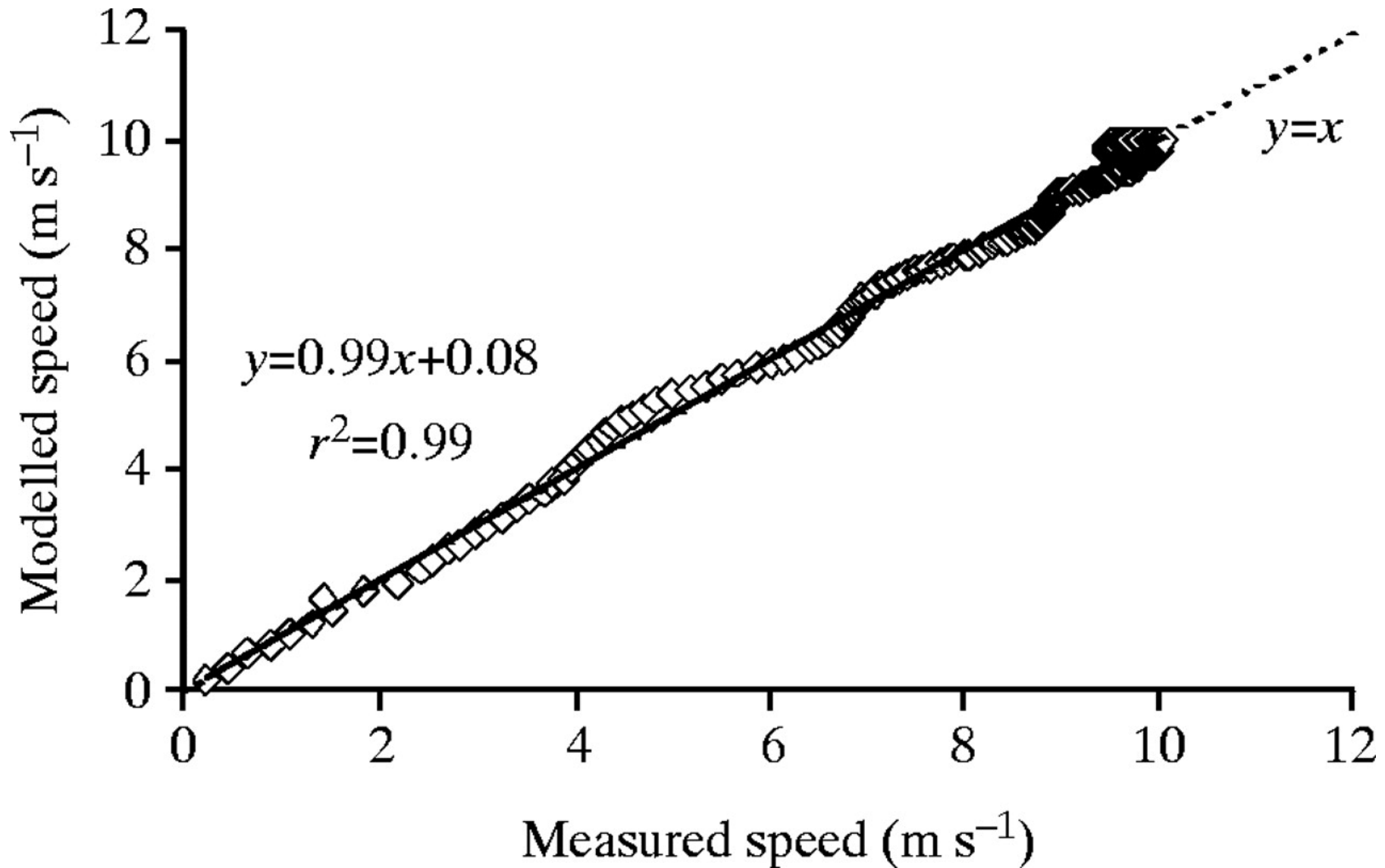


Dai dati è possibile calcolare la pendenza equivalente (ES) e la massa equivalente (EM). Inserendo poi i valori di ES ed EM nell'equazione di Minetti, è possibile stimare il costo energetico della corsa in accelerazione (in $\text{J}/(\text{kg m})$):

$$\text{Cr} = [155.4 \text{ ES}_5 - 30.4 \text{ ES}_4 - 43.3 \text{ ES}_3 + 46.3 \text{ ES}_2 + 19.5 \text{ ES} + 3.6] \text{ EM}$$

- $s(t) = s_{\max} (1 - e^{-t/\tau})$
- $a_f(t) = ds/dt = [s_{\max} - s_{\max}(1 - e^{-t/\tau})]/\tau$
- $d(t) = s_{\max} t - [s_{\max}(1 - e^{-t/\tau})] \tau$

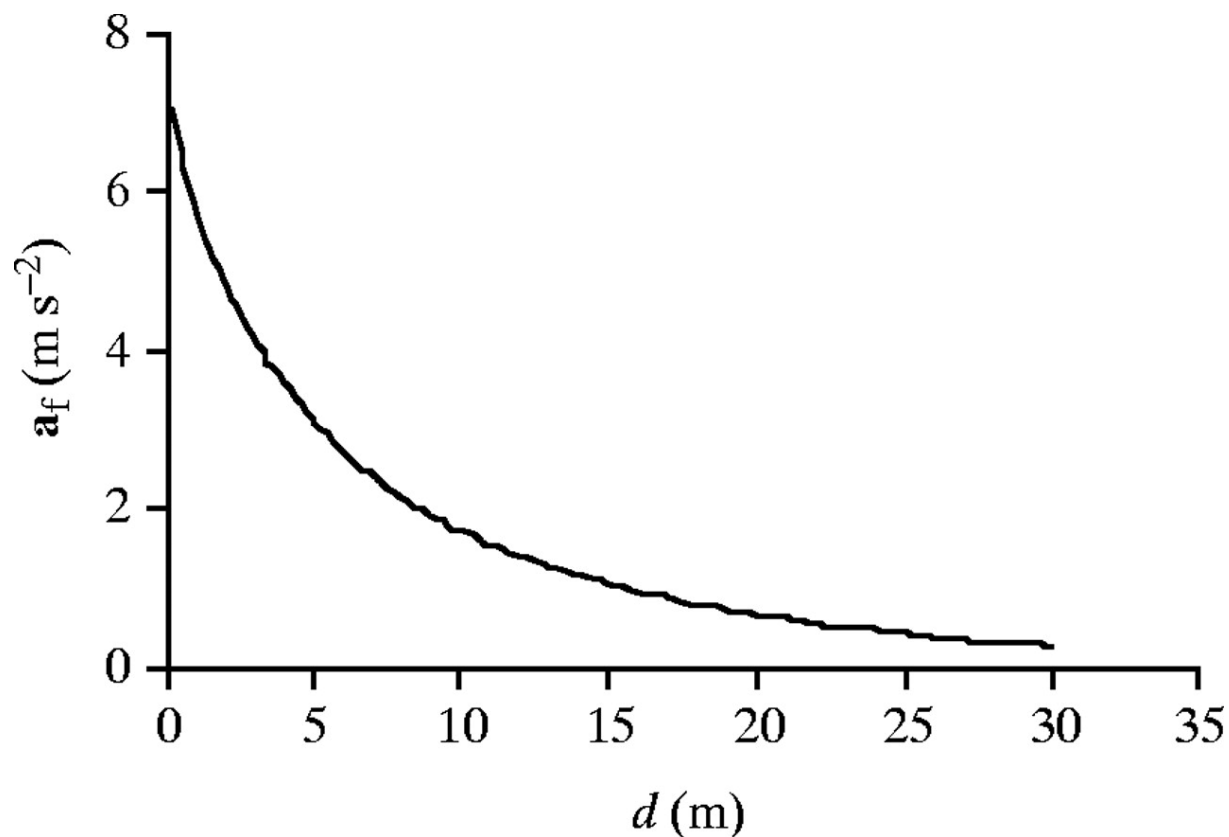
Running velocity as calculated by the exponential model, as a function of the actual running speed for Subject 7.



di Prampero P E et al. J Exp Biol 2005;208:2809-2816

The Journal of
**Experimental
Biology**

Accelerazione a_f in funzione di d



The instantaneous forward acceleration a_f (m s^{-2}), obtained as described in the text, is plotted as a function of the distance d (m).

di Prampero P E et al. J Exp Biol 2005;208:2809-2816

The Journal of
**Experimental
Biology**

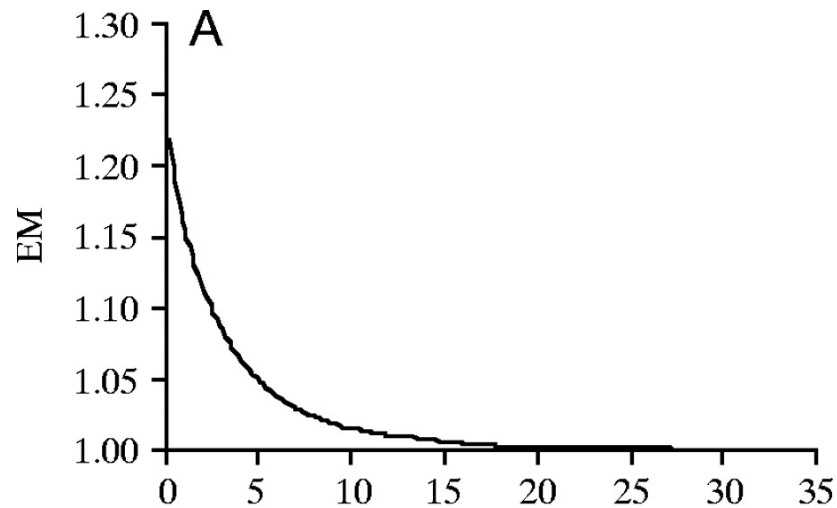
Costo energetico durante lo sprint

- $EC_r (\text{J kg}^{-1}\text{m}^{-1}) = 155.4 x^5 - 30.4 x^4 - 43.3 x^3 + 46.3 x^2 + 19.5 x + 3.6$
- $EC_r (\text{J m}^{-1}) = (155.4 ES^5 - 30.4 ES^4 - 43.3 ES^3 + 46.3 ES^2 + 19.5 ES + 3.6) EM$

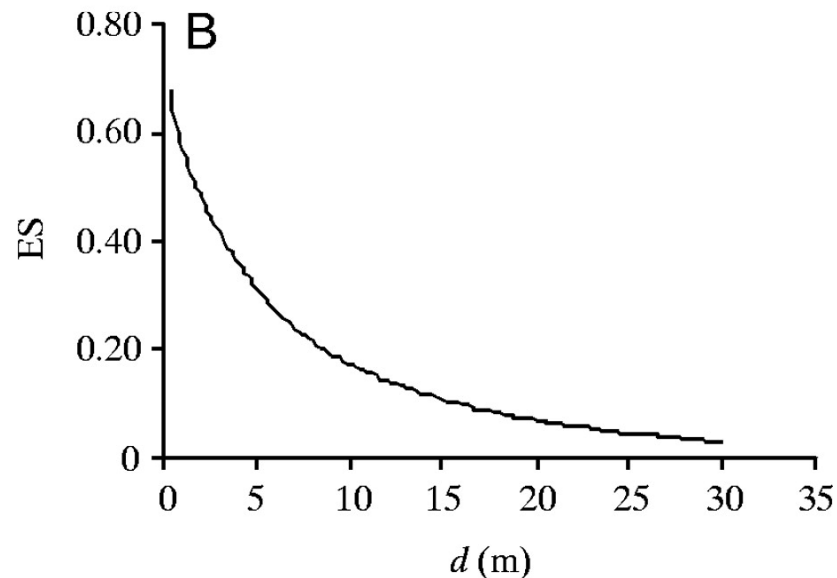
Table 2. *Grand averages of peak values of speed (s), forward acceleration (a_f), equivalent slope (ES) and equivalent body mass (EM)*

	s (m s ⁻¹)	a _f (m s ⁻²)	ES	EM
Mean	9.46	6.42	0.64	1.20
S.D.	0.19	0.61	0.06	0.03
CV	0.020	0.095	0.091	0.025

ES e EM in funzione di d



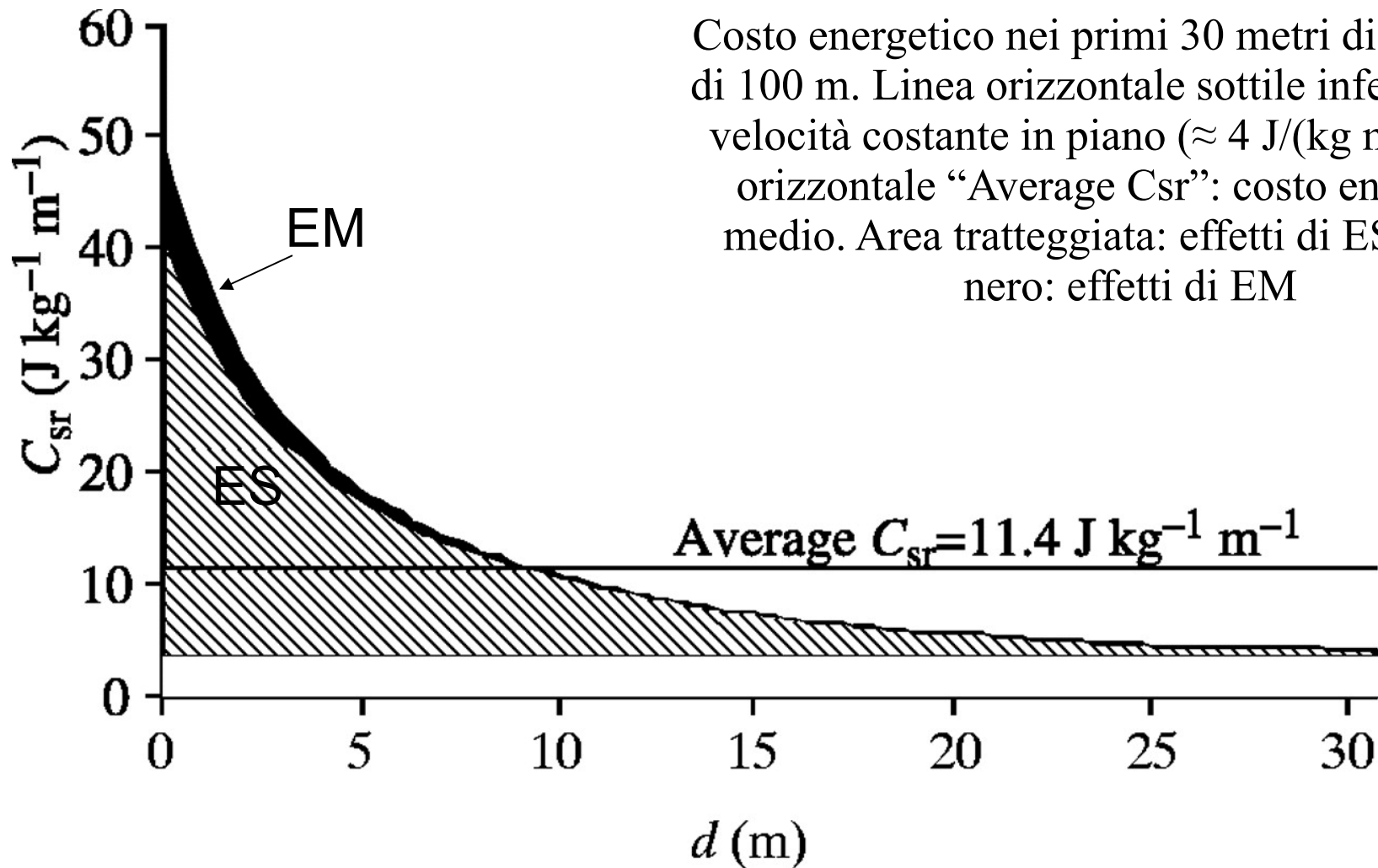
Massa equivalente
(EM) e pendenza
equivalente (ES) nei
primi 30 m nello
stesso soggetto.



**Dopo 30 m, i valori
di ES e EM
tendono a:
ES $\rightarrow$ 0
EM $\rightarrow$ 1,**

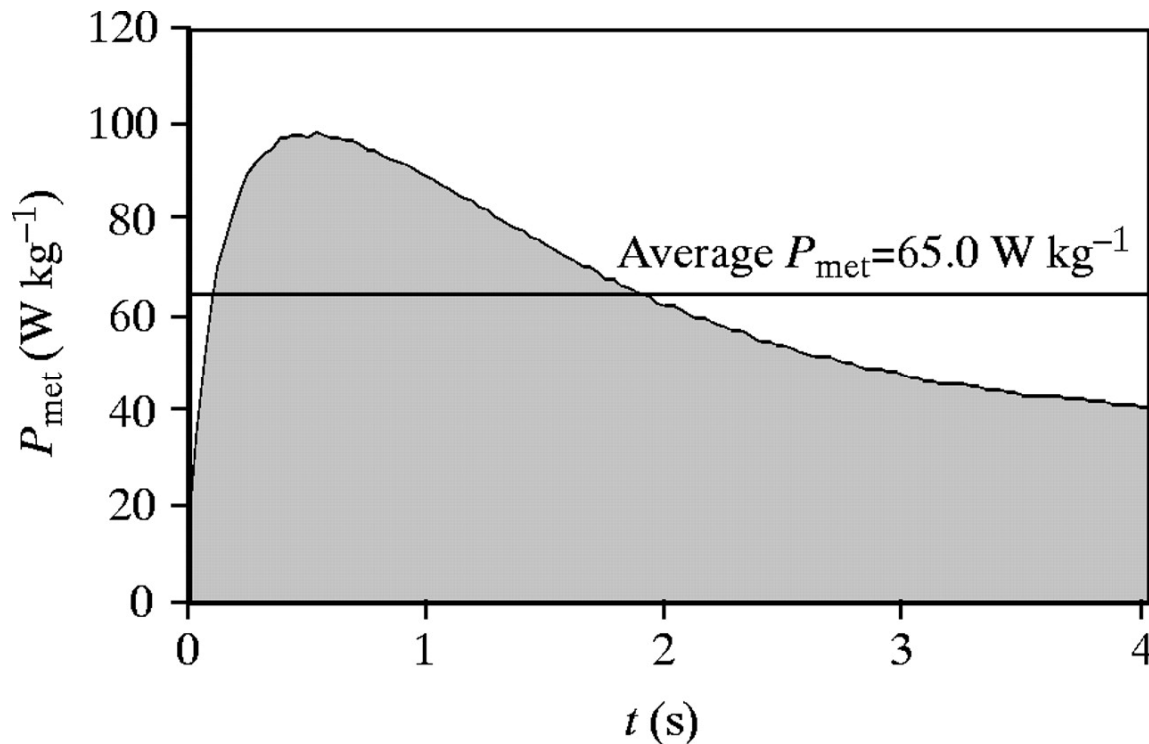
di Prampero P E et al. J Exp Biol 2005;208:2809-2816

Costo energetico della corsa sprint (EC_{sr})



ES è responsabile per la maggior parte dell'aumento di EC_{sr}

Potenza metabolica della corsa sprint (EC_{sr})



$$P\ (W\ kg^{-1}) = EC_{sr} * s$$

La potenza metabolica istantanea (P_{met} , W/kg) è il prodotto di C_{sr} ($J/(kg\ m)$) per la velocità (v , m/s): $P_{met} = C_{sr} * v$. La potenza media nei primi 30 m (circa 4 s) è 65 W/kg . NB: Un valore di VO_{2max} di 75 $ml/(kg\ min)$ al di sopra del valore di riposo corrisponde a 26 W/kg

Risultati e confronto

$$P \text{ (W kg}^{-1}\text{)} = EC_{sr} * s$$

Valori medi e di picco, e relativa deviazione standard (DS) (n = 12), del costo energetico dello sprint (C_{sr} , J/(kg.m)) e della potenza metabolica (P_{met} , W/kg). Il valore medio di C_{sr} è stato calcolato su 30 m e la potenza metabolica media su 4 s. I valori di picco si osservano nei primi 0,25 - 0,5 secondi

Media		Picco	
EC_{st} (J kg ⁻¹ m ⁻¹)	P_{met} (W kg ⁻¹)	EC_{st} (J kg ⁻¹ m ⁻¹)	P_{met} (W kg ⁻¹)
10.7 ± 0.59	61.0 ± 4.66	43.8 ± 10.4	91.9 ± 20.5
Carl Lewis			
ES	EM	EC_{st} (J kg ⁻¹ m ⁻¹)	P_{met} (W kg ⁻¹)
0.80	1.3	55.0	145.0

E_{met} stimata Carl Lewis (J kg⁻¹) = 650

Il costo energetico della corsa in accelerazione può essere riassunto in un'unica formula:

$$C_{sr} = (155.4 \cdot ES^5 - 30.4 \cdot ES^4 - 43.3 \cdot ES^3 + 46.3 \cdot ES^2 + 19.5 \cdot ES + 3.6) \cdot EM + k' \cdot v^2$$

v = velocità rispetto all'aria,

$$ES = (a_f/g) * 100$$

$$EM = \sqrt{a_f^2/g^2 + 1}$$

dove $k' \cdot v^2$ ($k' = 0.01 \text{ J} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ per kg di massa corporea),
è l'energia spesa per unità di distanza contro la
resistenza dell'aria.

Quest'equazione può essere risolta in funzione del tempo, purché la velocità, e quindi l'accelerazione, siano note. Inoltre il prodotto di C_{sr} per la velocità è la potenza metabolica istantanea.

Va sottolineato che questo approccio si basa su una serie di semplificazioni e presupposti:

i) il soggetto si muove come un “unicum” localizzato a livello del centro di massa.

Di conseguenza:

ii) il lavoro interno è trascurato.

Infine:

iii) si presuppone che l'equazione di Minetti sia valida anche per pendenze superiori (o inferiori) a quelle da cui fu ottenuta (tra - 45 % e + 45 %).

Bilancio energetico della corsa sprint

Scopo: stimare le quantità di energia anaerobica ed aerobica necessaria a Carl Lewis per coprire i 100 m

$$E = A_{nS} - V' O_{2\max} t - V' O_{2\max} \tau (1 - e^{-t/\tau})$$
$$\tau = 10 - 23 \text{ s}; V' O_{2\max} = 25 \text{ W kg}^{-1}$$

1. Massima energia che teoricamente potrebbe ottenere dalla **glicolisi anaerobia**:

$$20 \text{ mM} \cdot 3 \text{ mlO}_2 \text{ mM}^{-1} \text{ kg}^{-1} \cdot 20.9 \text{ J mlO}_2^{-1} = 1250 \text{ J kg}^{-1}$$

Bilancio energetico della corsa sprint

2. Massima energia che teoricamente potrebbe ottenere dalla scissione di **PCr** e **ATP**

$$0.25 \cdot 22 \text{ mmol kg}^{-1} \cdot 1/6 \text{ mmolO}_2/\text{mmol PCr} \cdot 22.4 \text{ mlO}_2/\text{mmolO}_2 \cdot 20.9 \text{ J mlO}_2^{-1} \\ = 430 \text{ J kg}^{-1}$$

$$3. E_{\text{tot}} = 430 + 1250 = 1680 \text{ J kg}^{-1}$$

Si può concludere, quindi, che la quantità di energia che deriva da **AnS** durante uno sprint sui 100 m è circa **1/3** della quantità totale di energia che si può ottenere dal completo sfruttamento di AnS

PARTE II

La potenza come vero misuratore dell'intensità nel calcio rispetto alla velocità

Applicazione dell'approccio riassunto nella Parte I al gioco del calcio, mediante “video match analysis”.

Energy Cost and Metabolic Power in Elite Soccer: a new Match Analysis Approach

C. Osgnach, S. Poser, R. Bernardini, R. Rinaldo, P.E. di Prampero.
Med. Sci Sport Exerc. 42: 170 – 178, 2010

Profilo energetico del calcio

(dalla letteratura)

- **Spesa energetica stimata:** 1200 – 1500 kcal
- **Potenza metabolica media stimata:** 70% di VO_2 max
 - Temperatura corporea
 - Freq. cardiaca
 - Consumo di O_2

Video Match Analysis

- 2-8 telecamere ai margini del campo;
- **Automatic tracking** dei giocatori (60% del tempo totale);
- **Manual tracking** (per il restante 40% del tempo);
- **Output:** posizione del giocatore (frequenza di campionamento 25 Hz: circa 3.000.000 di dati per partita);
- **Valutazione tecnica e tattica;**
- **Valutazione della prestazione atletica.**

Video Match Analysis Valutazione della prestazione atletica (dalla letteratura)

- **Distanza totale:** 10 – 13 km;
- **Fatica:** la distanza coperta nel 1° tempo è del 5-10% superiore a quella coperta nel 2° tempo;
- **Intensità,** classi di velocità:

Walking Jogging Running LS Running HS Sprinting;

70% del tempo totale: Walking, Jogging o Running LS ;

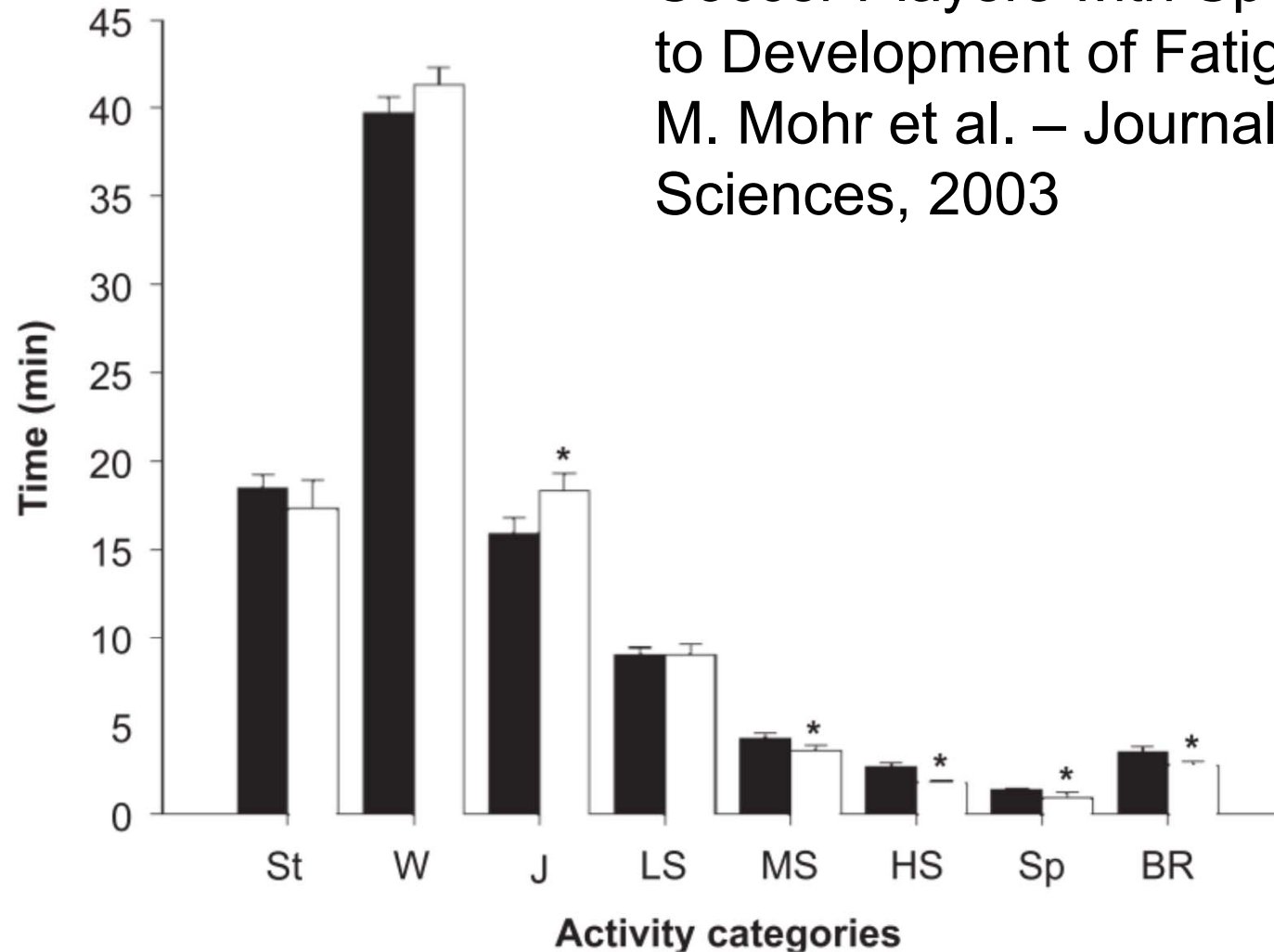
30% → 150-250 azioni di 15-20 metri Running HS

• ***Sprinting*** (definito come velocità di corsa superiore a 19-25 km/h): 5-10% della distanza totale, 1-3% del tempo totale.

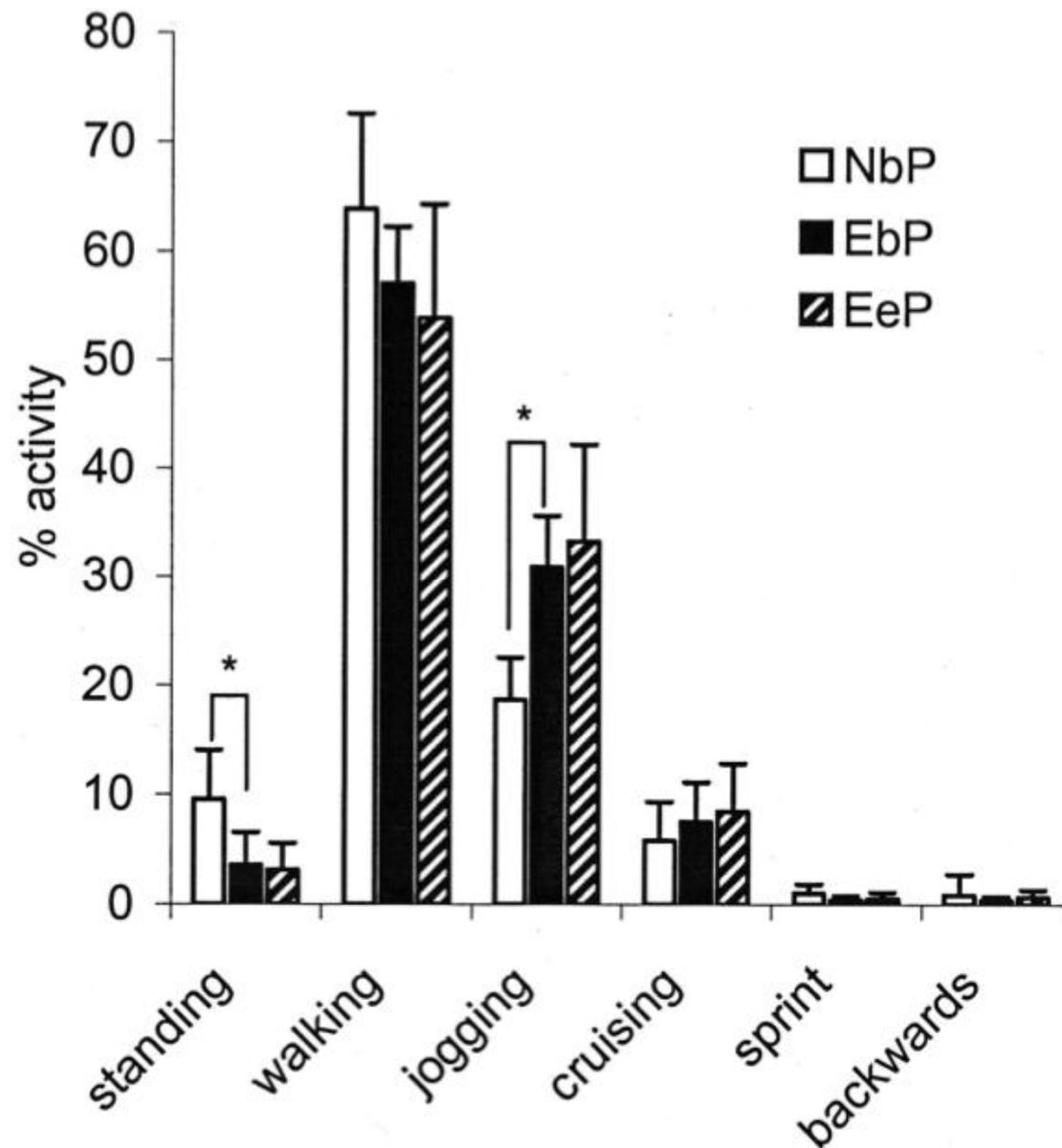
Per quanto dettagliate, queste analisi non tengono conto di un elemento essenziale del calcio: le accelerazioni e decelerazioni

ATHLETIC PERFORMANCE EVALUATION

Match Performance of High-Standard
Soccer Players with Special Reference
to Development of Fatigue
M. Mohr et al. – Journal of Sports
Sciences, 2003



ATHLETIC PERFORMANCE EVALUATION



Physiological Profile
and Activity Pattern
of Young Soccer
Players during
Match Play
J. Stroyer et al. –
Medicine and
Science in Sport
and Exercise, 2004

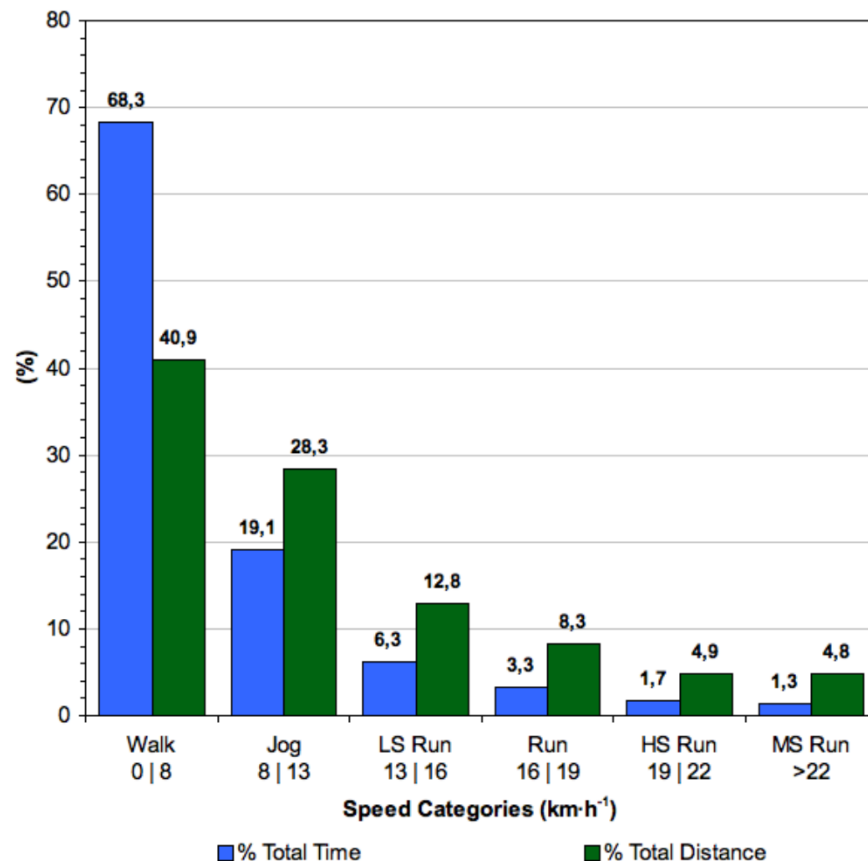
Lo studio:

399 giocatori di Serie A -
Campionato 2007-2008

- Oltre 50 partite
- Oltre 1,050 giocatori
- età 27 ± 4 anni
- Massa corporea 75.8 ± 5.0 kg
- statura 1.80 ± 0.06 m

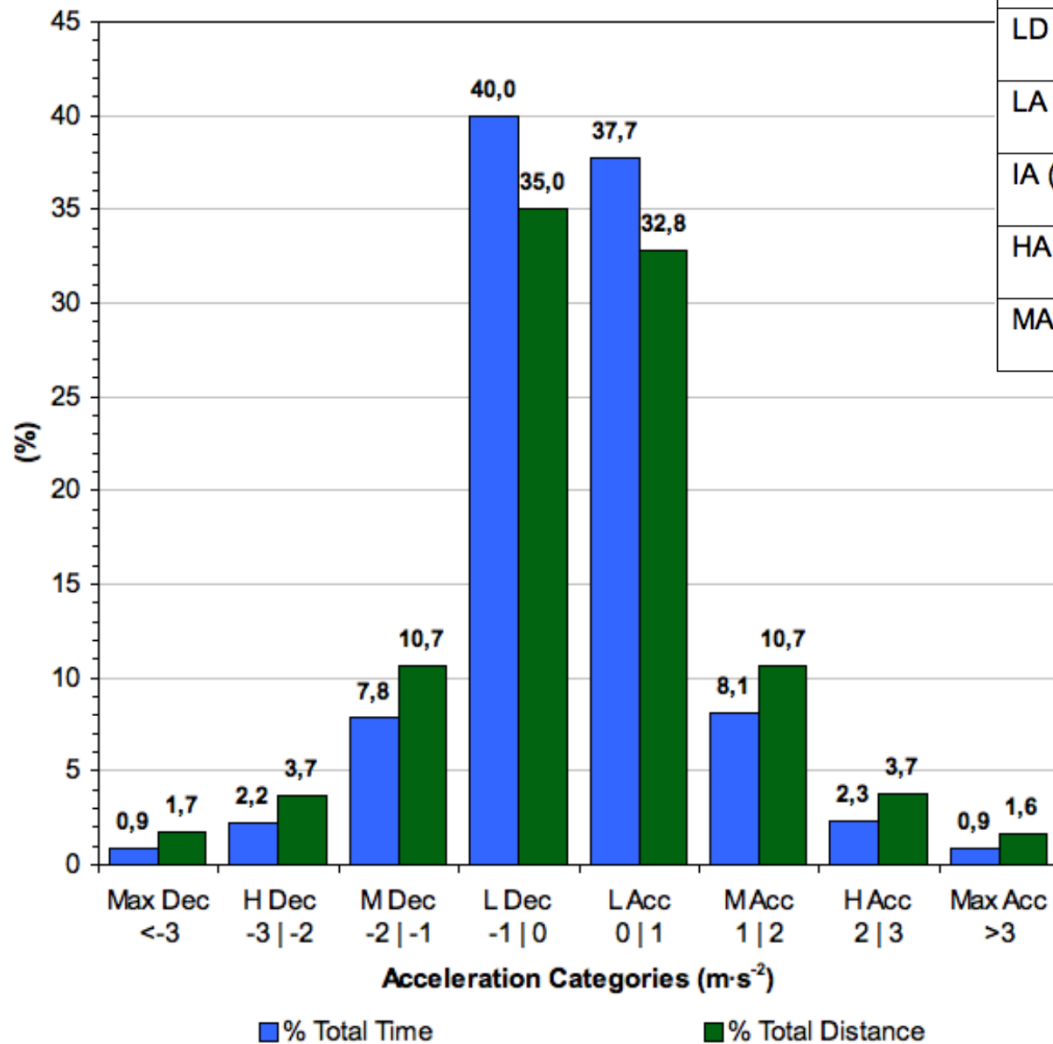
Match analisi tradizionale

- Tempo totale: **95 min 5 s $\pm$ 1 min 40**
- Distanza totale: **10950 $\pm$ 1044 m**
- Classi di velocità:



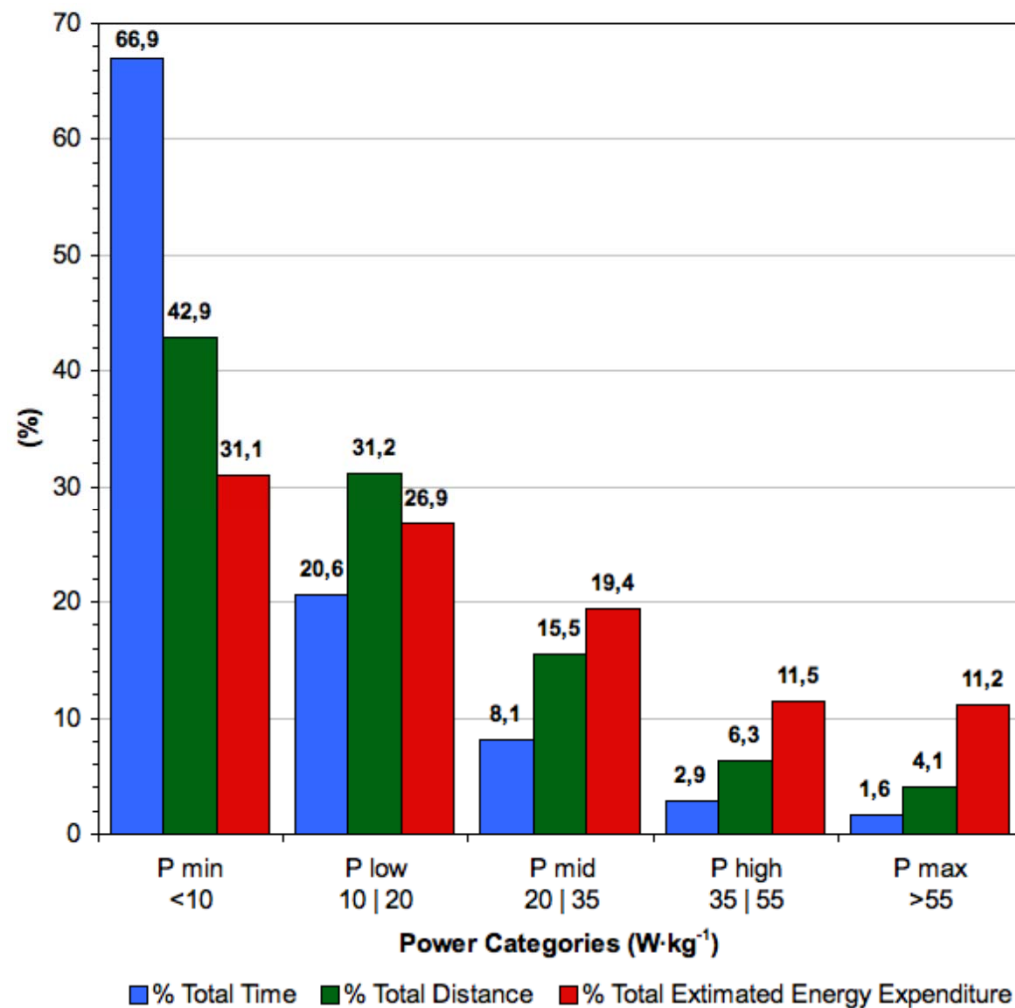
Speed Category	T	D
Walk (from 0 to 8 km·h ⁻¹)	3895±333 s	4421±322 m
Jog (from 8 to 13 km·h ⁻¹)	1089±169 s	3111±497 m
LSR (from 13 to 16 km·h ⁻¹)	357±89 s	1423±356 m
ISR (from 16 to 19 km·h ⁻¹)	191±56 s	919±270 m
HSR (from 19 to 22 km·h ⁻¹)	97±31 s	546±178 m
MSR (>22 km·h ⁻¹)	77±31 s	531±214 m
TOTAL	5705±100 s	10950±1044 m

Applicazione del : Cost of sprint running, **Csr**



Acceleration Category	T	D	EC
MD (<-3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	50±16 s	188±65 m	> 3.41 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
HD (from -3 to -2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	128±29 s	411±98 m	from 2.38 to 3.41 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
ID (from -2 to -1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	448±68 s	1176±206 m	from 2.38 to 2.77 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
LD (from -1 to 0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	2282±120 s	3821±335 m	from 2.77 to 4.64 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
LA (from 0 to 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	2152±102 s	3587±328 m	from 4.64 to 7.81 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
IA (from 1 to 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	461±59 s	1176±184 m	from 7.81 to 12.03 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
HA (from 2 to 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	133±29 s	411±95 m	from 12.03 to 17.28 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
MA (>3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	51±18 s	180±67 m	> 17.28 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$

Dal prodotto tra Csr e velocità istantanea, sono state calcolate le Classi di Potenza metabolica



Power Category	T	D	EEE
LP (from 0 to 10 W·kg ⁻¹)	3818±299 s	4647±230 m	19.01±1.21 kJ·kg ⁻¹ 4.54±0.29 kcal·kg ⁻¹
IP (from 10 to 20 W·kg ⁻¹)	1173±161 s	3435±572 m	16.41±2.34 kJ·kg ⁻¹ 3.92±0.56 kcal·kg ⁻¹
HP (from 20 to 35 W·kg ⁻¹)	461±91 s	1718±380 m	11.89±2.39 kJ·kg ⁻¹ 2.84±0.57 kcal·kg ⁻¹
EP (from 35 to 55 W·kg ⁻¹)	163±38 s	670±173 m	6.99±1.63 kJ·kg ⁻¹ 1.67±0.39 kcal·kg ⁻¹
MP (>55 W·kg ⁻¹)	91±28 s	451±144 m	6.82±2.22 kJ·kg ⁻¹ 1.63±0.53 kcal·kg ⁻¹

Applicazioni : Match analysis

1. Match analysis

Determinazione di distanza (d), velocità (v) e accelerazione (a), tempo totale (T) e distanza totale (TD)

2. Match activities

Suddivisione in diverse categorie di v (6), a (4 positive, 4 negative) e potenza (5)

Costo energetico e potenza

1. Costo totale (EC)

Calcolato sommando i dispendi parziali calcolati considerando la distanza coperta nei diversi tratti e i tratti percorsi in accelerazione positiva e negativa

2. Equivalent distance (ED)

$$ED = W \text{ (total energy exp. J kg}^{-1}\text{)} / (EC_{\text{terreno in piano}} \cdot 1,29)$$

3. Equivalent distance index (EDI)

$$EDI = ED/TD$$

Costo energetico e potenza

4. Potenza (W)

$$E' = EC \cdot v$$

5. Anaerobic Index

$$AI = \Sigma W_{TP} / \Sigma W$$

dove $\Sigma W_{TP} > 20 \text{ W kg}^{-1}$

Risultati :v, d, EC, EEE,

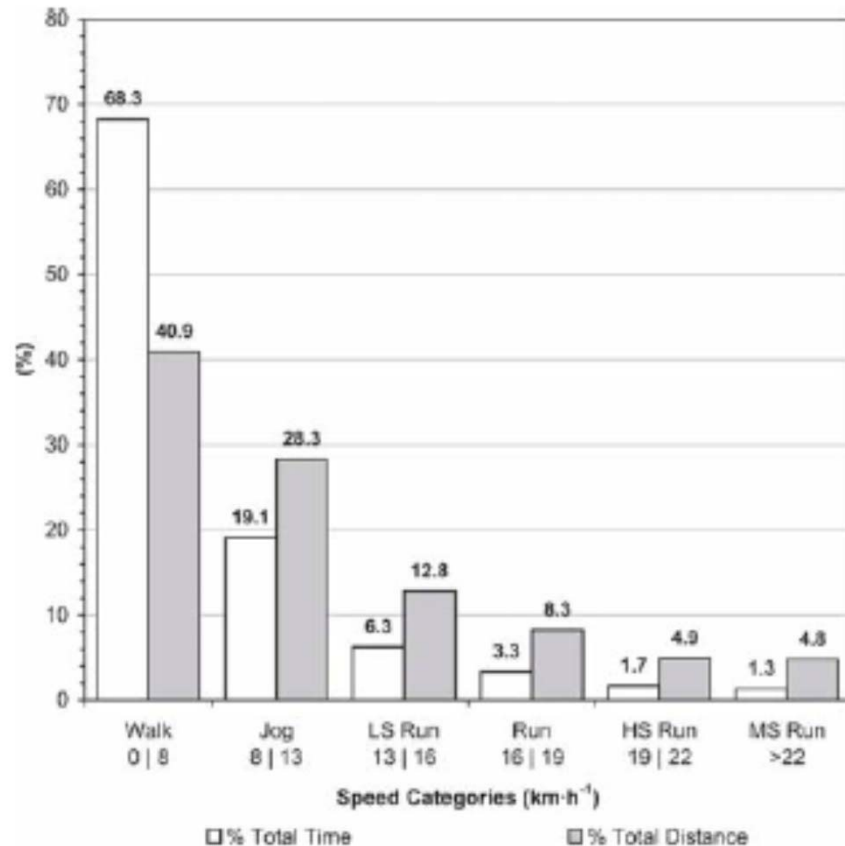


FIGURE 2—*T* and *D* (%) during the entire match in each speed category.

TABLE 2. *T* (s), *D* (m), and corresponding EC (J·kg⁻¹·m⁻¹) during the entire match in each acceleration category (mean ± SD).

Acceleration Category	<i>T</i> (s)	<i>D</i> (m)	EC (J·kg ⁻¹ ·m ⁻¹)
MD (< -3 m·s ⁻²)	50 ± 16	188 ± 65	>3.41
HD (from -3 to -2 m·s ⁻²)	128 ± 29	411 ± 98	From 2.38 to 3.41
ID (from -2 to -1 m·s ⁻²)	448 ± 68	1176 ± 206	From 2.38 to 2.77
LD (from -1 to 0 m·s ⁻²)	2282 ± 120	3821 ± 335	From 2.77 to 4.64
LA (from 0 to 1 m·s ⁻²)	2152 ± 102	3587 ± 328	From 4.64 to 7.81
IA (from 1 to 2 m·s ⁻²)	461 ± 59	1176 ± 184	From 7.81 to 12.03
HA (from 2 to 3 m·s ⁻²)	133 ± 29	411 ± 95	From 12.03 to 17.28
MA (>3 m·s ⁻²)	51 ± 18	180 ± 67	>17.28

As detailed in the Theoretical Model section, the EC of accelerated and decelerated running was obtained from the individual acceleration values, and the corresponding ES and EM was obtained with equation 4; the so-obtained results were then multiplied by the grassy terrain constant (KT = 1.29).

TABLE 3. *T* (s), *D* (m), and EEE (kJ·kg⁻¹ or kcal·kg⁻¹) during the entire match in each power category (mean ± SD).

Power Category	<i>T</i> (s)	<i>D</i> (m)	EEE
LP (from 0 to 10 W·kg ⁻¹)	3818 ± 299	4647 ± 230	19.01 ± 1.21 kJ·kg ⁻¹ 4.54 ± 0.29 kcal·kg ⁻¹
IP (from 10 to 20 W·kg ⁻¹)	1173 ± 161	3435 ± 572	16.41 ± 2.34 kJ·kg ⁻¹ 3.92 ± 0.56 kcal·kg ⁻¹
HP (from 20 to 35 W·kg ⁻¹)	461 ± 91	1718 ± 380	11.89 ± 2.39 kJ·kg ⁻¹ 2.84 ± 0.57 kcal·kg ⁻¹
EP (from 35 to 55 W·kg ⁻¹)	163 ± 38	670 ± 173	6.99 ± 1.63 kJ·kg ⁻¹ 1.67 ± 0.39 kcal·kg ⁻¹
MP (>55 W·kg ⁻¹)	91 ± 28	451 ± 144	6.82 ± 2.22 kJ·kg ⁻¹ 1.63 ± 0.53 kcal·kg ⁻¹

a, t

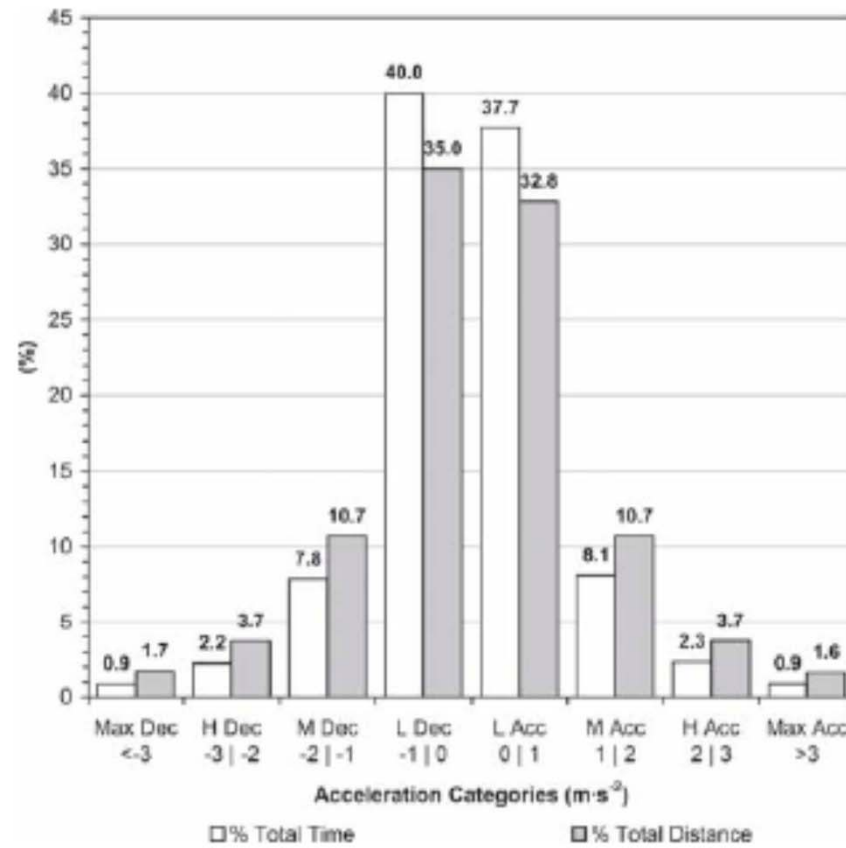


FIGURE 3—*T* and *D* (%) during the entire match in each acceleration category.

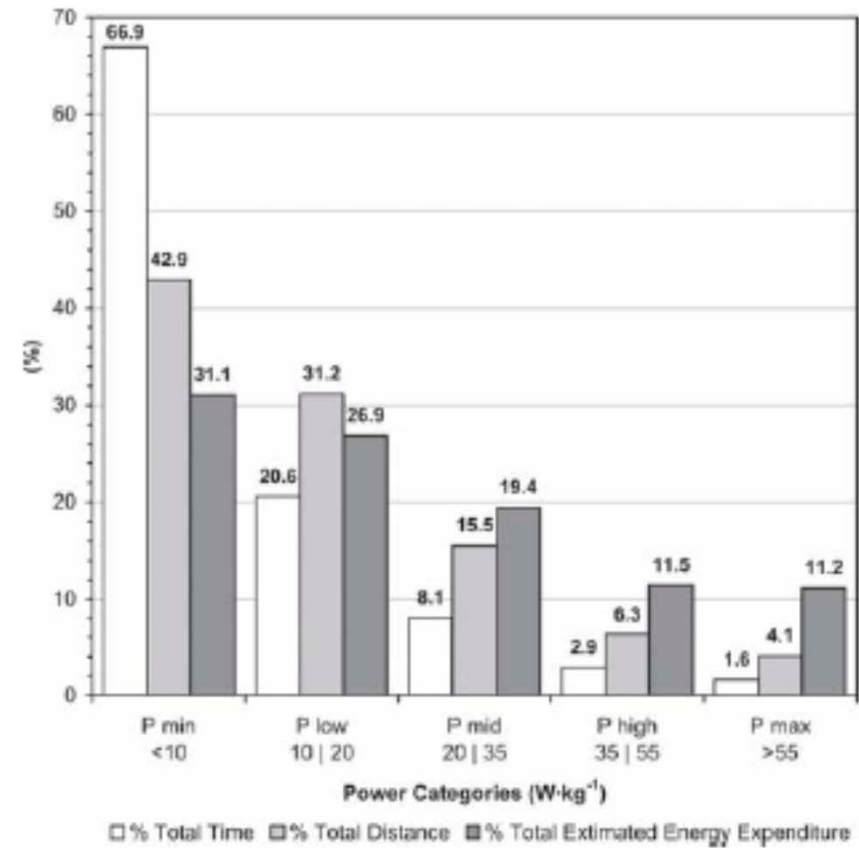


FIGURE 4—*T*, *D*, and *EEE* (%) during the entire match in each power category.

Risultati

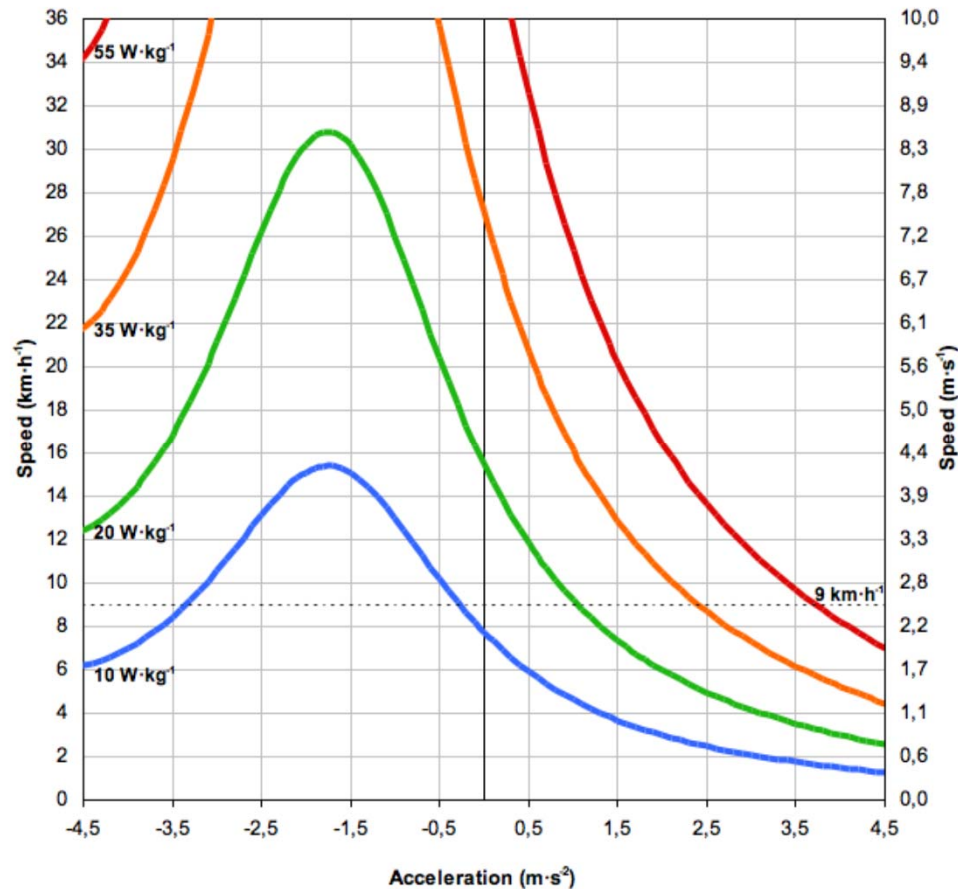


FIGURE 5—Isopower relationships calculated as function of speed (y-axis) and acceleration (x-axis). A speed of $9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (horizontal sketched line) yields different power outputs depending on acceleration. For example, at a constant speed ($9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), the metabolic power would amount to approximately $13 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, whereas at the same speed, but with an acceleration of 1 or $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, the metabolic power would increase to 20 or to $35 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. Conversely, decelerated running would bring about a reduction of metabolic power.

W e accelerazione

- La stessa velocità media può corrispondere a potenze metaboliche diverse se si tiene conto dell'accelerazione
- Questo è il contributo innovativo dello studio

Distanza Equivalente

ED

I calciatori più pigri sono caratterizzati da EDI più bassi, quelli più dinamici sono caratterizzati da EDI più elevati

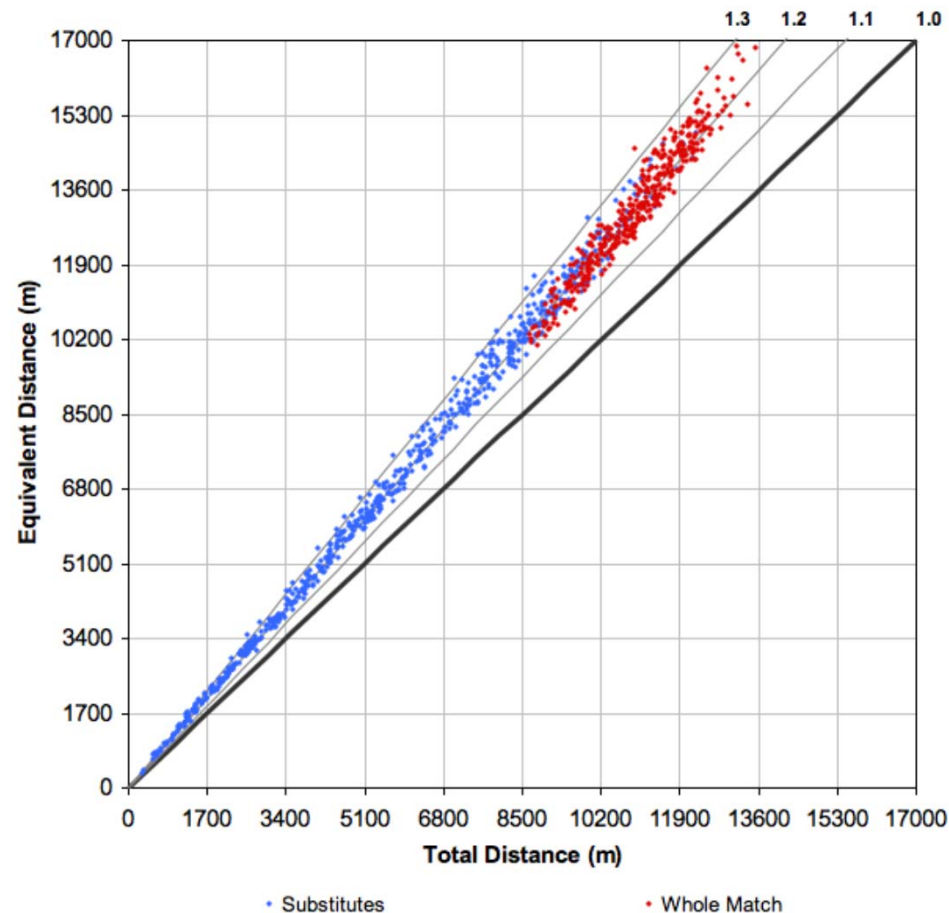


FIGURE 6—ED is plotted as a function of TD. Players who complete the whole match are symbolized in *black circles*, whereas substitutes are symbolized in *gray circles*. Every *straight line* represents a constant ratio between ED and TD defined as EDI.

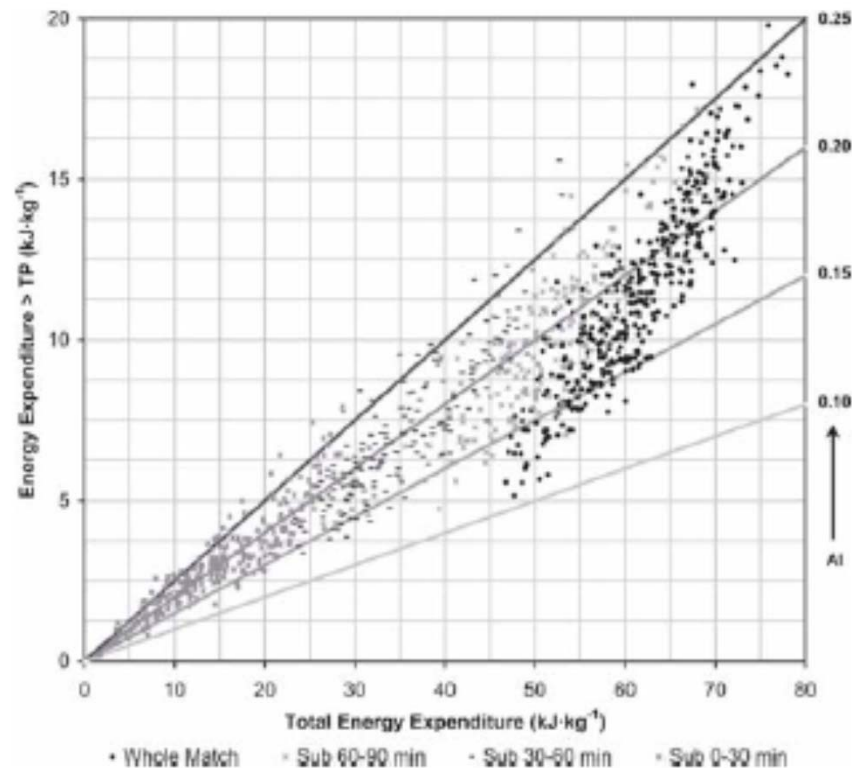


FIGURE 8—Energy expenditure above TP is plotted as a function of total energy expenditure. Players who completed the whole match are symbolized in *black circles*, substitutes who played from 60 to 90 min are symbolized in *gray crosses*, substitutes who played from 30 to 60 min are symbolized in *gray dashes*, and substitutes who played from 0 to 30 min are symbolized in *gray asterisks*. Every *straight line* represents a constant ratio between total energy expenditure and energy expenditure above TP defined as AI.

Anaerobic Index (AI)

- AI varia tra 0,15 e 0,25
- Ciò significa che il 15-25 per cento dell'energia metabolica totale è prodotta a intensità metaboliche massimali-sovra massimali