

REFLEXIONS

sobre la mecànica i el metabolisme
del treball de la **FORÇA MUSCULAR**



Jaume A. Mirallas Sariola, Gabriel Esparza Pérez,
Dr. Piero Galilea Ballarini, Dr. Franček Drobnič Martínez

REFLEXIONS

sobre la mecànica i el metabolisme del treball de la **FORÇA MUSCULAR**

*Thoughts about mechanics
and muscle strength metabolism work*

JAUME A. MIRALLAS SARIOLA

*Departament de Preparació Física. Centre
d'Alt Rendiment de Sant Cugat del Vallès (Barcelona)*

GABRIEL ESPARZA PÉREZ

*Oficina ARC. Centre d'Alt Rendiment de
Sant Cugat del Vallès (Barcelona)*

DR. PIERO GALILEA BALLARINI

*Departament de Fisiologia. Centre d'Alt
Rendiment de Sant Cugat del Vallès (Barcelona)*

DR. FRANCIK DROBNIC MARTÍNEZ

*Programa de Salut, Recerca i Serveis. Centre d'Alt
Rendiment de Sant Cugat del Vallès (Barcelona)*

AGRAÏMENTS

Molt especialment al Juanjo Andújar per la seva capacitat innovadora i qualitat humana; a l'Óskar Escalante per compartir els seus coneixements sobre l'acrobàcia i per l'ajuda en la recerca bibliogràfica; al Dr. Andreu Arquer per fer possible la integració mèdico-esportiva en benefici de la salut i l'esport; al Xavier Balius pel seu suport tècnic i col·laboració.

Reservats tots els drets. Ni la totalitat ni part d'aquest llibre poden reproduir-se ni transmetre per cap procediment electrònic o mecànic, incloent fotocòpies, gravació magnètica o qualsevol emmagatzematge d'informació i sistema de recuperació, sense previ permís escrit de l'editor.

© 2019 Jaume A. Mirallas Sariola (jmirallas@car.edu), Gabriel Esparza Pérez, Dr. Piero Galilea Ballarini, Dr. Franchek Drobnic Martínez.

Ergon
C/ Arboleda, 1. 28221 Majadahonda (Madrid)
C/ Berruguete, 50. 08035 Barcelona

ISBN: 978-84-17844-00-4
Depósito legal: M-13416-2019

ÍNDEX

RESUM	4
INTRODUCCIÓ	5
LA FORÇA MUSCULAR	5
El treball de la força muscular	7
Unitats de mesura del treball i de la potència de la força muscular	7
A) Unitat de mesura del treball	7
B) Unitat de mesura de la potència	8
El treball mecànic i la potència mecànica	9
A) El treball mecànic	9
B) La potència mecànica	10
Mesurament del treball mecànic i la potència mecànica	10
Increment progressiu d'esforç	13
El treball metabòlic i la potència metabòlica	14
A) El treball metabòlic	14
B) La potència metabòlica	14
Mesurament del treball metabòlic i la potència metabòlica	15
CONCLUSIONS	15
BIBLIOGRAFIA	16

RESUM

En l'àmbit de l'esport, la capacitat de produir tensió dels grups musculars es defineix com a força muscular. La força muscular es la causa del moviment del cos humà, que ens permet realitzar qualsevol exercici. Dels principis de la mecànica i de la fisiologia, i de les seves aplicacions al moviment del cos humà, en concret a les accions esportives, era necessari fer un procés d'anàlisi i reflexió del treball de la força muscular. En l'entrenament esportiu, l'esportista genera energia mecànica i metabòlica. I alhora produeix força muscular, que es transforma en treball mecànic i metabòlic. La valoració i control d'aquest treball mecànic i metabòlic és fonamental per dosificar racionalment la intensitat i el volum de la càrrega de les sessions d'entrenament i optimitzar el rendiment de l'esportista. El treball mecànic i metabòlic són dos variables resultants de la producció d'energia mecànica i metabòlica amb una relació de proporcionalitat directa. El treball mecànic és el producte d'una força pel desplaçament o per la velocitat. I la valoració del treball metabòlic es mesura a partir del treball mecànic, que representa un 24% de l'eficiència del treball metabòlic, resultat obtingut d'una forma indirecta del consum d'oxigen (VO_2) a partir de la càrrega realitzada. Els professionals de l'esport podran mesurar millor el treball de la força muscular: el treball mecànic és equivalent al 24% del treball metabòlic.

PARAULES CLAU: força muscular, treball mecànic, treball metabòlic.

ABSTRACT

In the field of sport, the capacity to produce muscle tension is defined as muscle strength. Muscle strength is the responsible for the movement of the human body, which allows us to perform exercise. From the principles of mechanics and physiology, and their applications to human movement, specifically to sporting actions, it was necessary a process of analysis and reflection of the work of muscular strength. In sports training, athletes generate mechanical and metabolic energy. At the same time produce muscle strength, which is transformed into mechanical and metabolic work. The evaluation and control of this amount of mechanical and metabolic work is essential to rationally adjust the intensity and volume of the training sessions load and to optimize athletic performance. Mechanical and metabolic work are two resultant variables from mechanical and metabolic energy production a relation of direct proportionality. Mechanical work is the product of a force multiplied by a displacement or a velocity. Metabolic work is measured from mechanical work, which represents 24% of metabolic work efficiency, indirectly obtained from oxygen consumption (VO_2) as a result of the supported load. Sports professionals can better measure the work of muscle strength: mechanical work is equivalent to 24% of the amount of metabolic work.

KEYWORDS: muscle strength; mechanical work; metabolic work.

INTRODUCCIÓ

L'objectiu del contingut d'aquest article és donar a conèixer en l'àmbit de l'esport com es pot mesurar la gran quantitat d'energia produïda per la força muscular. També en la rehabilitació funcional de l'aparell locomotor i la readaptació a l'entrenament pot ser de gran utilitat. Pretén informar a tots aquells professionals del món l'esport, especialment als llicenciats i graduats en ciències de l'activitat física i de l'esport, entrenadors, preparadors físics, metges, fisioterapeutes, recuperadors, biomecànics, que la força muscular es mesura com un treball mecànic i metabòlic per poder quantificar i dosificar racionalment la càrrega de les sessions d'entrenament i optimitzar el rendiment de l'esportista.

Els professionals del món de l'esport no solament han de tenir clar els conceptes, sinó que també han de conèixer amb exactitud quines lleis regeixen l'entrenament esportiu i com afecten a l'esportista: la llei psicofisiològica de Selye (síndrome general d'adaptació); la llei psicofisiològica de Schultz (lindar de sensibilitat individual) i la llei psicofísica de Weber-Fechner (relació de la magnitud d'un estímul físic i la seva percepció) són els seus fonaments. La metodologia de l'entrenament esportiu ha de permetre dosificar la fatiga com a conseqüència de l'estrès provocat pel treball mecànic (T_M) i el treball metabòlic (T_{MT}) de la força muscular. La intensitat de l'estímul de la càrrega ha de causar una resposta d'adaptació, controlant la relació quantitativa entre la magnitud d'aquest estímul i com és percebut per l'esportista.

Només amb les tres lleis fonamentals de l'entrenament esportiu no és possible mesurar la quantitat de T_M i T_{MT} produït per l'esportista. Les Reflexions sobre la mecànica i el metabolisme del treball de la força muscular

permetran saber com mesurar aquesta quantitat de T_M i T_{MT} . La seva valoració i control ha de proporcionar la informació necessària per poder dosificar de forma racional la intensitat i el volum de la càrrega de les sessions d'entrenament.

LA FORÇA MUSCULAR

La força muscular és qualsevol tensió produïda pels grups musculars. Es defineix com la capacitat del sistema neuromuscular per generar tensió en els diferents grups musculars durant un temps determinat (González Badillo & Gorostiaga Ayestarán, 2002). Aquesta tensió es pot efectuar durant menys temps (ràpida) o més temps (lenta) i permetrà realitzar qualsevol moviment. L'avaluació del temps emprat (rapidesa) del T_M i T_{MT} s'anomena potència mecànica (P_M) i potència metabòlica (P_{MT}) respectivament. La força muscular és el resultat de la integració de múltiples tensions musculars, que es manifesten com a força muscular estàtica i força muscular dinàmica.

En funció de la intensitat d'aquestes tensions musculars es classifiquen les manifestacions de la força muscular (Fig. 1).

La força muscular dinàmica¹ és causa del moviment del cos humà i produeix un T_M i T_{MT} ; en canvi, la força muscular estàtica² (Tous, 1999) és causa de la posició d'equilibri del cos en situacions estàtiques i produeix un T_{MT} amb un T_M igual a 0. Però aquest T_{MT} que pot ser de vegades molt elevat, genera una tensió mecànica (σ)³ i una pressió intramuscular produïda per vibracions.

Aquestes vibracions són petits moviments periòdics, repetitius al voltant d'una posició d'equilibri estàtic de totes les parts del cos involucrades en la força muscular estàtica, que es mouen juntes en la matei-

1 La força muscular dinàmica genera un esforç psicofísic i psicofisiològic.

2 La força muscular estàtica només genera un esforç psicofisiològic (Tous, 1999).

3 Llei de Hooke.

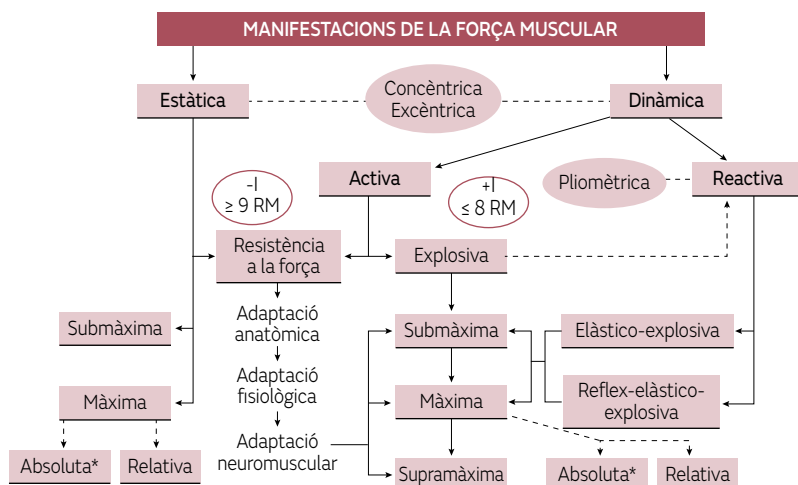


FIGURA 1. Les manifestacions de la força muscular (*La força absoluta no es manifesta de forma voluntària, ni en l'entrenament ni en la competició, només en situacions psicològiques extremes).

xa direcció i que consumeixen energia⁴ i, en conseqüència, poden ocasionar fatiga neuromuscular⁵.

La força muscular estàtica també pot manifestar-se acompanyada de la força muscular dinàmica, estabilitzant, donant suport o contrarestant les accions musculars dinàmiques. Aquest tipus d'accions són més freqüents en l'esport que les pròpies accions musculars estàtiques. El més rellevant és la utilització integrada de la força muscular estàtica i la força muscular dinàmica en la rehabilitació funcional i en els programes de prevenció de lesions.

El T_M i T_{MT} de la força muscular dinàmica és el producte de l'esforç realitzat per l'esportista i està dirigit per la seva capacitat d'activació

i de resistència psicofisiològica. La força muscular dinàmica utilitza l'alternança entre tensió i relaxament de la contracció muscular (acció de bombeig) i això garanteix en gran mesura la irrigació muscular, facilitant la utilització del metabolisme aeròbic (Zintl, 1991), la regulació de la temperatura i el pH⁶. Aquest T_M i T_{MT} pretén assolir el màxim rendiment de l'esportista en la competició, produint canvis funcionals i estructurals en el seu organisme i noves adaptacions en el seu comportament psicomotor. Per aconseguir-ho és imprescindible integrar les lleis fonamentals de l'entrenament esportiu⁷. La mesura òptima específica de la quantitat de T_M i T_{MT} quedarà determinada per la velocitat amb la que es realitza l'exercici, que es defineix en el camp de la física, com a P_M ,

4 L'energia té les següents propietats: es transfereix, es transforma, es pot emmagatzemar i es transporta.

5 La fatiga neuromuscular (central o perifèrica) provoca adaptacions del sistema neuromuscular per tal de mantenir la producció de la força muscular. La fatiga neuromuscular pot entendre's com un procés adaptatiu i protector alhora, que limita l'activitat muscular nociva per a l'organisme.

6 El pH és una mesura quantitativa de l'acidesa o l'alcalinitat de la sang.

7 Llei de la Síndrome General d'Adaptació, llei del Llindar i llei de Weber-Fechner.

i en l'àmbit de l'entrenament esportiu, com a força explosiva.

La conseqüència del T_M i T_{MT} de la força muscular dinàmica és un estrès en l'esportista (síndrome general d'adaptació), que pot considerar-se una emoció (és l'activació⁸ del seu comportament psicomotor per ser creatiu) i el ritme d'execució mesura el grau d'emoció (d'activació), producte de la intensitat de l'estímul de la càrrega de l'entrenament i causant de la fatiga. De la sensibilitat cinestèsica (Mirallas, 2007) de l'esportista (l'indiar de sensibilitat individual) per captar el T_M i T_{MT} dependrà la seva reacció, que s'anomena adaptació. La relació entre la intensitat del T_M i T_{MT} i la sensació produïda en l'esportista és proporcional a la magnitud d'aquest T_M i T_{MT} (relació de la magnitud d'un estímul físic i la seva percepció).

EL TREBALL DE LA FORÇA MUSCULAR

El treball de la força muscular és la quantitat de T_M i T_{MT} resultat del procés de transformació d'energia química en metabòlica, per la ruptura del trifosfat d'adenosina (ATP⁹) en difosfat de adenosina (ADP), que es perd en forma de calor, i una petita part és transferida a la contracció muscular i transformada en força muscular.

La força muscular es manifesta de forma estàtica i dinàmica. Qualsevol contracció muscular no genera necessàriament moviment, aquest dependrà de la magnitud¹⁰ de la càrrega exercida i de la tensió produïda pels grups musculars.

L'energia metabòlica de la contracció muscular majoritàriament prové de l'ATP i només

una part d'aquesta energia és produïda pels aliments. La ATP transporta l'energia metabòlica a l'interior de les cèl·lules a través del metabolisme energètic per transformar-la en energia mecànica. És l'intermediari energètic necessari en la transducció¹¹ de l'energia metabòlica dels aliments ingerits en l'energia mecànica de la contracció muscular i en el T_M . En el llenguatge esportiu s'han incorporat els termes metabolisme aeròbic i anaeròbic. En realitat, aquests termes responen al comportament metabòlic de les cèl·lules musculars durant l'esforç.

Unitats de mesura del treball i de la potència de la força muscular

A) Unitat de mesura del treball

La unitat de mesura, a partir d'un patró de referència, és el valor numèric estandarditzat d'una determinada magnitud, que s'obté com a resultat d'un mesurament amb la finalitat de controlar i optimitzar una dosificació racional de les càrregues de treball de les sessions d'entrenament. És necessari quantificar el treball de la força muscular amb una unitat de mesura determinada. Tot seguit s'expliquen les unitats de mesura del treball de la força muscular.

$$1J = 1N \cdot m = \left(\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot m = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$1J = 1 \text{ joule}$; $1N \cdot m = 1 \text{ newton-metre}$; $m = \text{metres}$; $\text{kg} = \text{quilograms}$; $s = \text{segons}$

La unitat de mesura del treball de la força muscular i també de l'energia mecànica¹² i l'energia metabòlica és el joule (J). El J es defineix com la quantitat de T_M o T_{MT} realitzat per una força constant d'un newton durant un me-

8 Activació: tensió psiconeuromotora (Mirallas, 2007)

9 L'ATP és la principal molècula de transferència d'energia en les reaccions químiques utilitzada per tots els organismes vius.

10 Força necessària per a modificar l'estat de moviment o repòs d'un cos amb una determinada massa.

11 La transducció de l'energia és el mecanisme de la síntesi de la ATP i el transport de ions per la membrana plasmàtica, la membrana interna de les mitocondries i la membrana tilacoide (membranes transductores de l'energia).

12 L'energia mecànica és la suma de les energies cinètica i potencial d'un cos. De vegades, l'energia mecànica d'un cos pot estar formada només per un d'aquests dos tipus d'energia. En l'entrenament esportiu, l'energia mecànica es defineix com la capacitat que té l'esportista per realitzar un treball.

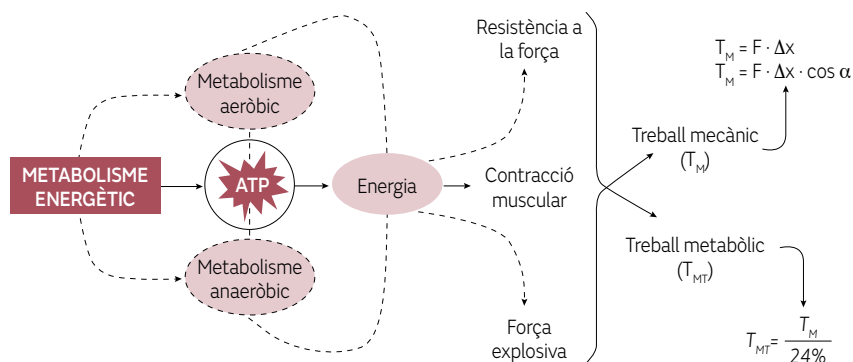


FIGURA 2. El metabolisme aeròbic i anaeròbic es transforma en el treball de la força muscular.

tre de longitud en la mateixa direcció de la força (N·m).

El joule (J) permet quantificar el treball de la força muscular d'un exercici constant en desplaçar-se una trajectòria (distància) en una situació concreta i també avaluar de forma global la quantitat de treball de la força muscular de tots els exercicis desenvolupats en el procés d'entrenament esportiu. D'aquesta manera, l'entrenador pot controlar la càrrega del treball de la força muscular i programar una dosificació racional en cadascun dels exercicis.

B) Unitat de mesura de la potència

En l'esport és molt útil mesurar el treball de la força muscular d'un exercici en relació amb el temps (potència de la força muscular): la P_M que mesurarà el T_M en watts (W), i la P_{MT} que mesurarà el T_{MT} en joules per segon (J/s), com a unitats de mesura. Cal recordar que 1 joule és equivalent a 1 watt per segon (W·s) o 1 newton per metre (N·m) i 1 watt és equivalent a 1 J/s. El T_M i T_{MT} es pot efectuar de manera

ràpida o lenta, però això no fa variar el resultat del treball.

$$1J = 1Ws = 1N \cdot m$$

$$1W = 1 \frac{J}{s} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = 1 \frac{N \cdot m}{s}$$

Per assolir l'èxit en la competició esportiva les accions tàctiques es realitzen en el menor temps possible. La velocitat i el ritme d'execució caracteritzen el tipus de moviment i de desplaçament. La velocitat d'execució és el grau de rapidesa amb la que es realitzen aquestes accions i el ritme d'execució, l'interval de temps entre una acció i la següent. Per valorar l'efectivitat funcional¹³ de les accions tàctiques (T_M), que representa la valoració qualitativa de la despesa energètica, és imprescindible elaborar-les en òptimes condicions d'eficàcia i relacionar la velocitat i el ritme d'execució amb l'assoliment dels objectius proposats.

Tot seguit es mostren dos exemples per il·lustrar la diferència entre el T_M i T_{MT} en funció de la velocitat d'execució (no es contempla el

13 Efectivitat funcional o funcionalitat és l'acció tècnica o tàctica perfectament adaptada a la tasca per a la qual ha estat dissenyada.

TAULA I. Per exemple, una acció tècnica de taekwondo executada a la màxima velocitat (v) possible, un "ap chagui" (colpeig frontal amb el peu), pot generar un T_M de 540 J amb una P_M de 2160 W. I aquesta acció tècnica executada en la fase d'aprenentatge a una velocitat (v) moderada genera el mateix T_M de 540 J, però amb una P_M de 540 W, un 75% inferior

Acció tècnica de taekwondo "ap chagui"	F (N)	m (kg)	a (m/s^2)	v (m/s)	e (m)	t (s)	T_M (J)	P_M (W)	T_{MT} (J)	P_{MT} (W)	E (kcal)	E (W)
1R (màxima v possible)	360	30	12	6	1,5	0,25	540	2160	2266	9064	0,13	0,15
5R (màxima v possible)						3564	14956		0,85		0,99	
1R (v moderada)				1,5		540	2266	0,13	0,15			
5R (v moderada)				1		3564	14956	0,85	0,99			

ritme d'execució, perquè el moviment només es realitza una vegada) d'una acció tècnica i un exercici psicofísic (càlcul a partir de la despesa calòrica amb un quocient respiratori de 4,85 kcal/L VO_2 en el QR = 0,84; relació VO_2 - T_{MT} de 12,4 ml/min/watt, que representa un 24% de l'eficiència del T_{MT}).

EL TREBALL MECÀNIC I LA POTÈNCIA MECÀNICA

A) El treball mecànic

El T_M és l'energia mecànica transformada en energia cinètica (E_c). És el resultat de la transferència de l'energia mecànica a un cos, que es mou a una velocitat constant i que depèn de la seva massa i de la velocitat aconseguida. El T_M de l'esportista pot fer variar el seu estat de moviment, però també pot generar un T_M degut a la posició, que ocupa en l'espai. L'energia mecànica d'un cos és la suma de les seves energies: l'energia cinètica (E_c), associada al moviment, l'energia potencial (E_p), que depèn només de la posició o l'estat del sistema involucrat, l'energia po-

tencial gravitacional (E_{pg}) i l'energia potencial elàstica (E_{pe}).

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

E_c (J) = energia cinètica; m (kg) = massa del cos; v (m/s) = velocitat del cos

L'energia cinètica (E_c)¹⁴ és la capacitat¹⁵ de T_M d'un cos a causa del seu moviment i és equivalent a la quantitat¹⁶ de T_M necessari per establir la seva velocitat a partir del seu estat de repòs. És proporcional a la massa del cos i augmenta amb la velocitat. L'energia cinètica (E_c) s'aconsegueix aplicant una força sobre un cos per tal de produir canvis en la seva velocitat. I, quan més temps s'estigui aplicant aquesta força, major serà la velocitat del cos.

L'energia potencial gravitacional (E_{pg})¹⁷ és el treball del camp gravitatori i a aixecar un cos a una altura determinada, capaç de generar una quantitat de T_M com a conseqüència de la seva posició i/o configuració. Pel fet de trobar-se sota la força de la gravetat, depèn de la posició vertical del cos i de la seva massa. L'energia

14 L' E_c està basada en la 2ª llei de Newton. A partir de l' E_c se'n deriva el teorema de l' E_c i el teorema de la conservació de l' E_c .

15 La capacitat s'entén com la potencialitat per a l'execució d'un treball.

16 La quantitat s'entén com un treball mesurable.

17 Llei de Kepler basades en la observació del moviment dels planetes, que van facilitar més tard a Newton la formulació de la Llei de la gravitació universal.

TAULA II. Per exemple, un exercici psicofísic executat a la màxima velocitat (v) possible, un "leg extension" (extensió de la cama), pot generar un T_M de 537 J amb una P_M de 1074 W. I aquest exercici psicofísic executat a una velocitat (v) molt lenta genera el mateix T_M de 537 J, però amb una P_M de 67 W, un 94% inferior

Exercici psicofísic "leg extension"	F (N)	m (kg)	a (m/s^2)	v (m/s)	e (m)	t (s)	T_M (J)	P_M (W)	T_{MT} (J)	P_{MT} (W)	E (kcal)	E (W)
1R (màxima v possible)	736	75	9,81	1,46	0,73	0,5	537	1074	2254	4508	0,13	0,15
5R (màxima v possible)							3545		14876		0,85	0,98
1R (v molt lenta)				0,09		8	537	67	2254	282	0,13	0,15
5R (v molt lenta)							3545		14876		0,85	0,98

potencial gravitacional (E_{pg}) no està relacionada amb el desplaçament dels cossos, sinó amb l'aptitud que tenen els cossos de generar determinades forces, depenent de la seva situació dins un espai gravitatori.

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h$$

E_{pg} (J) = energia potencial gravitacional; m (kg) = massa del cos; g (m/s^2) = acceleració de la gravetat; h (m) = altura del cos

L'energia potencial elàstica (E_{pe}) és la capacitat de T_M emmagatzemada com a conseqüència de la deformació d'un objecte elàstic, tal com l'estirament d'una molla. És igual al T_M realitzat per estirar la molla, que depèn de la constant de proporcionalitat k^{18} i també de la distància estirada. La força requerida per estirar la molla és directament proporcional a la quantitat d'estirament: es necessita dos vegades la força per estirar-lo dos vegades la seva longitud.

$$E_{pe} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot dx^2$$

E_{pe} (J) = energia potencial elàstica; k (N/m) = constant de proporcionalitat; dx = distància

B) La potència mecànica

La P_M és el producte de la força aplicada per la velocitat (energia mecànica). La P_M d'un

moviment circular (en dues dimensions) és la relació entre el T_M desenvolupat i l'interval de temps (dt) invertit en realitzar-lo:

$$P_M = \frac{T_M}{dt}$$

P_M = potència mecànica; T_M = treball mecànic; dt = interval de temps

En canvi, la P_M d'un moviment rectilini pot expressar-se com el producte de la força (F) per la velocitat (v), perquè la força i el desplaçament són paral·lels. El desplaçament, expressat en metres (m), és el resultat (vector) de calcular la posició final menys la posició inicial. I la distància, també expressada en metres (m), és la longitud de la trajectòria: $P_M = F \cdot v$.

La P_M és igual al T_M dividit entre l'interval de temps (dt), producte de la força resultant aplicada, per la velocitat, tal com s'expressa tot seguit:

$$P_M = \frac{T_M}{dt} = F \cdot \frac{\Delta x}{t} \rightarrow \frac{\Delta x}{t} = v \rightarrow F \cdot v = P_M$$

F = força; Δx = desplaçament; t = temps; v = velocitat

Mesurament del treball mecànic i la potència mecànica

En el T_M només es té en compte la component de la força, que actua en la direcció del desplaçament del cos. Aquest producte

18 Llei de Hooke: es fa evident en la zona elàstica (tensió i allargament unitari).

escalar ens permet obtenir un nombre real de l'operació de dos vectors. Així, el T_M és el producte escalar¹⁹ de dos vectors entre el valor de la força (F), expressat en newtons, i el vector desplaçament (Δx), expressat en metres. El cosinus α és la raó de l'angle, que formen el desplaçament amb la força aplicada. Però, si el cosinus α és igual a 0, el T_M és igual a la força pel desplaçament:

$$T_M = F \cdot \Delta x \cdot \cos \alpha; T_M = F \cdot \Delta x$$

F = força; Δx = desplaçament; $\cos \alpha$ = cosinus α

El T_M realitzat per una força constant, que actua sobre un cos i que es mou amb moviment rectilini, el definim com el producte escalar de la força pel desplaçament: espai recorregut en línia recta, des de la posició A fins a la posició B, mesurat en joules (J). Però per conèixer l'eficàcia d'aquest T_M , la velocitat a la qual es realitza aquest moviment, cal mesurar-lo en joules per segon (J/s) o també en watts (W), que representa la quantitat d'energia en joules (J) utilitzada per segon (s), anomenada P_M .

Mesurar el T_M en joules (J) i la P_M en watts (W) permet quantificar la càrrega de l'entrenament amb diferents unitats de mesura. També l'energia produïda per la P_M es pot mesurar en kilocalories (kcal).

El T_M d'un moviment rectilini i d'algun moviment circular, quan només hi ha una articulació mòbil, o d'un moviment de trajectòries curvilínies, com en l'arrencada en halterofília (habituals en l'entrenament de la preparació física), es pot mesurar com la quantitat de T_M d'una força constant en desplaçar-se una distància o com la quantitat de T_M d'una força per unitat de temps: P_M . El T_M que una força es capaç de produir, es codifica com a intensitat.

I tantes vegades com es repeteix aquest T_M es codifica com a volum, producte de les repeticions (R) per les sèries (S) dels exercicis.

Procediment per mesurar la T_M amb la fórmula que es descriu a la figura 3.

Procediment per mesurar el P_M amb la fórmula que es descriu a la figura 4.

En l'entrenament esportiu el T_M es mesura amb l'expressió valor qualitatiu, que representa el concepte intensitat (expressa el tipus de T_M que és), i amb l'expressió valor quantitatiu, que representa el concepte volum (no expressa el tipus de T_M que és). Però el valor qualitatiu de la intensitat i el valor quantitatiu del volum són indicadors bàsics de mesura²⁰, una mesura inespecífica del T_M que dóna una referència de proporcionalitat (normalment percentual) de la valoració d'aquest T_M . La quantificació de la intensitat i del volum necessita d'un instrument per al mesurament del T_M , un indicador específic de mesura²¹, pres com a patró de referència, o d'una composició d'altres indicadors definits prèviament. I el mesurament d'aquest T_M donarà un valor numèric, que quantificarà matemàticament la intensitat i el volum del T_M de l'entrenament. D'aquesta manera, es pot començar a plantejar de forma racional la dosificació d'un T_M eficaç, que ha de permetre iniciar el procés psicofisiològic d'adaptació i provocar un efecte positiu de l'entrenament i també una millora de la salut de l'esportista.

Els indicadors específics de mesura són les magnituds físiques fonamentals i derivades de la intensitat i del volum i les magnituds fisiològiques de la intensitat (aquí es proposen les més accessibles per a l'entrenador). Cada indicador específic de mesura porta associada la seva unitat de mesura.

19 Un escalar és un nombre real, associat a qualsevol tipus de magnitud física, que és contínua. Els escalars tenen magnitud, però no direcció, cosa que els distingeix dels vectors.

20 Els indicadors bàsics de mesura són la intensitat i el volum de les càrregues de treball de les sessions d'entrenament, una mesura inespecífica. En l'entrenament esportiu és necessari utilitzar els indicadors específics de mesura (magnituds físiques i fisiològiques), que permeten quantificar el T_M i el T_{MP} , atorgant-li un valor numèric estandaritzat, una unitat de mesura, a partir de un patró de referència i, d'aquesta manera, dosificar racionalment la programació de l'entrenament.

21 La unitat de mesura és el valor numèric estandaritzat d'una determinada magnitud.

$$T_M(J) = \underbrace{(F \cdot \Delta x)}_{\substack{\text{Energia} \\ \text{mecànica } (E_M)}} \cdot \underbrace{(((R-1) \cdot 0,4) + (R-1) + 1) \cdot S}_{((R-1) \cdot 0,4 + R) \cdot S}$$

$$E_M \cdot ((R-1) \cdot 0,4 + R) \cdot S$$

FIGURA 3. Mesurament del treball mecànic (T_M) en joules (J) d'una força (F) constant sobre un cos en desplaçar-se una distància (Δx) amb un moviment rectilini.

La força (F), l'acceleració (a), la velocitat (v = la distància en relació amb el temps) i l'energia cinètica (E_C) són les magnituds físiques fonamentals de la intensitat, que representen els indicadors específics de mesura, i les seves unitats de mesura són valors numèrics: de la força (F) en newtons (N), de l'acceleració (a) en m/s^2 , de la velocitat (v) en m/s i de l'energia cinètica (E_C) en joules (J), per exemple, 450 N, 6 m/s^2 , 2 m/s , 900 J. Aquests valors numèrics representen el volum de la intensitat, un nou concepte per definir la intensitat de la càrrega. La quantificació de la intensitat amb una unitat de mesura és el volum d'aquesta intensitat.

Els valors de la distància recorreguda i el desplaçament només coincideixen, quan la trajectòria és una recta (moviment rectilini). En un moviment rectilini la distància i el desplaçament són equivalents. En un moviment circular, quan només hi ha una articulació mòbil, o en un moviment de trajectòries curvilínies la distància és sempre major que el desplaçament.

La distància (longitud de la trajectòria sense relació amb el temps) és una magnitud física fonamental del volum. Les repeticions (R) i les sèries (S) d'un exercici són magnituds físiques derivades del volum. Les seves unitats de mesura són els valors numèrics en m o km (distància), en un nombre natural (R i S), per exemple, 3.000 m, 3 km, 6 R, 3 S. Aquests

$$P_M(W) = \underbrace{(F \cdot v)}_{\substack{\text{Potència} \\ \text{mecànica } (P_M)}} \cdot \underbrace{(((R-1) \cdot 0,4) + (R-1) + 1) \cdot S}_{((R-1) \cdot 0,4 + R) \cdot S}$$

$$P_M \cdot ((R-1) \cdot 0,4 + R) \cdot S$$

FIGURA 4. Mesurament de la potència mecànica (P_M) en watts (W) d'una força (F) constant sobre un cos per la velocitat (v) a la qual es mou amb un moviment rectilini.

valors numèrics representen la intensitat del volum, un nou concepte per definir el volum de la càrrega. La quantificació del volum amb una unitat de mesura és la intensitat d'aquest volum. A més, existeix un grau progressiu d'esforç a partir de la segona R d'una S, que també és necessari mesurar per quantificar més exactament el valor numèric del volum (intensitat del volum).

A l'hora d'utilitzar les unitats de mesura per elaborar les càrregues treball de les sessions d'entrenament, cal tenir en compte que en tota mesura experimental es produeixen dos tipus d'errors: el de l'instrumental, propi del material o sistema, que es fa servir per mesurar, i el corresponent al procés de mesura. Per aquest motiu la mesura exacte no és tant important com és la l'aplicació d'una relació de proporcionalitat de les dades obtingudes, malgrat els inevitables errors de mesura.

La intensitat i el volum de les càrregues de treball de les sessions d'entrenament mantenen una relació d'interdependència i de proporcionalitat inversa. La densitat²², entesa com la relació entre el temps de treball i el temps de recuperació, ha de permetre el control d'aquestes relacions.

Per a un gran nombre d'autors la intensitat és la principal variable, que orienta i condiciona les adaptacions a l'entrenament (Kraemer, Fleck & Deschenes, 1988; Gibala et al., 2006;

²² La densitat (ρ) és l'interval entre l'esforç (càrrega de l'entrenament) i el temps de recuperació en un exercici durant una sessió d'entrenament. També s'identifica amb l'espai de temps entre les sessions i la seva distribució en el microcicle, mesocicle i macrocicle de l'entrenament.

Indicadors bàsics de mesura		Indicadors específics de mesura		Unitats de mesura
Intensitat	Magnituds físiques fonamentals	Força (N, kg · m/s ²) Acceleració (m/s ²) Velocitat (m/s) Energia cinètica (J, kg·m ² /s ²)		
	Magnituds físiques derivades	Velocitat i ritme d'execució (m/s) Freqüència (R/s, rpm, Hz) Densitat (s, min, h, d)		
	Magnituds fisiològiques	Freqüència cardíaca (p/min) Freqüència respiratòria (RPM, L/min) VO ₂ i VO ₂ màx (ml/kg/min, L/min)		
Volum	Magnituds físiques fonamentals	Massa (kg) Temps (s, min) Longitud (m, km)		
	Magnituds físiques derivades	Repeticions (R) Sèries (S) Durada de les sessions (h:m:s) Freqüència de les sessions (h, d)		

FIGURA 5. Propietats mesurables de les càrregues de treball de les sessions d'entrenament: els indicadors bàsics de mesura, els indicadors específics de mesura i les seves unitats de mesura.

Helgerud et al., 2007). La utilització incontrolada de la intensitat i del volum pot generar efectes i adaptacions molt diferents a les previstes en el desenvolupament de les capacitats psicofísiques de l'esportista.

Increment progressiu d'esforç

Per entendre el concepte d'increment progressiu d'esforç cal tenir una referència d'un altre concepte, la càrrega psicofísica màxima, codificada com a 1RM, entesa com la màxima quantitat de pes (kg), que és capaç de moure o suportar l'esportista una sola vegada (1RM=100% d'esforç) en un exercici psicofísic. En l'actualitat es fa servir el concepte d'1RM per avaluar la capacitat màxima de resistència metabòlica de l'esportista. Des d'un punt de vista metodològic, l'1RM es pren com a referència per treure percentatges de la càrrega psicofísica i elaborar els programes d'entrenament.

La majoria d'autors de referència coincideixen en les següents proposicions: a) 3RM=95% d'esforç; b) 5RM=90% d'esforç. L'increment progressiu d'esforç es fonamenta en l'anàlisi de la relació d'aquestes proposicions. Per calcular l'increment progressiu d'esforç es pren la rela-

ció de la primera proposició i s'argumenta de la següent manera: al 95% d'esforç li corresponen 3RM. Entre el 95% i el 100% d'esforç hi ha un espai de 5 intervals (5 int) d'un 1% cadascun. En la primera R de cada S l'increment és 0. I es calcula de la següent manera: (3RM-1R)/5 int=0,4. Amb la mateixa argumentació es pren la relació de la segona proposició: (5RM-1R)/10 int=0,4.

$$(RM-1)/int=0,4 \quad (RM-1)=0,4 \cdot int \quad RM=0,4 \cdot int+1$$

L'increment progressiu d'esforç és el grau de fatiga, que suporta l'esportista a partir de la segona R en una S d'un exercici psicofísic i que s'acumula quantes més R i S realitza. Aquest grau de fatiga es quantifica amb el valor 0,4 per a cada R a partir de la segona R de cada S i es codifica com a constant F0,4. El valor 0,4 es multiplica pel total de R, menys la primera R de cada S, a aquest producte se li sumen les R i el resultat es multiplica per les S per quantificar el valor numèric del volum i la intensitat del volum de la càrrega d'entrenament.

Com es pot comprovar l'anàlisi de la relació d'ambdues proposicions ofereixen el mateix resultat. A més, l'increment progressiu d'esforç o

constant $F_{0,4}$ també serveix per elaborar diferents fórmules per a la predicció de les RM i SM en cada franja percentual de l'1RM i també per a la predicció de l'1RM.

EL TREBALL METABÒLIC I LA POTÈNCIA METABÒLICA

A) El treball metabòlic

El T_{MT} és l'energia metabòlica transferida a la contracció muscular i transformada en força muscular. La contracció muscular és poc eficient alhora de transformar el T_{MT} en T_M . De l'energia metabòlica només s'aprofita entre un 24-30% per transformar-la en energia mecànica i la resta, entre un 76-70%, es transforma en calor. No s'han de confondre els canvis d'habilitat psicomotora a causa del entrenament amb l'avaluació de l'eficiència del T_{MT} . Existeix una relació lineal VO_2-T_{MT} molt consistent en tota la població tant sedentària com esportiva. Això significa que l'eficiència del T_{MT} està condicionada en relació al tipus de T_M . Aquesta relació VO_2-T_{MT} no depèn del nivell d'entrenament, ni de la edat, ni del gènere, però sí del pes corporal. Un augment del pes corporal pot representar una desviació ascendent d'uns 5,8 ml/min/kg en la relació VO_2-T_{MT} (Wasserman, 2005). Sedentaris i esportistes, ja siguin joves o grans, homes o dones, tots tenen una eficiència del T_{MT} similar. Per mesurar l'eficiència del T_{MT} s'utilitzen exercicis relativament simples, que no depenguin de l'especialització tècnica de l'esportista: ciclisme o cursa a peu.

L'eficiència del T_{MT} es valora amb la relació lineal VO_2-T_{MT} de 10 ml/min/watt (Wasserman et al., 2005), amb l'equivalent calòric del VO_2 en situació estable o steady-state²³ de 4,96 kcal/L VO_2 en el QR=0,95 i la P_{MT} de 0,014 kcal/min/watt d'almenys dos exercicis (Wasserman et

al., 2005), que representa un 30% de l'eficiència del T_{MT} (Whipp & Wasserman, 1969; Wasserman & Whipp, 1975).

En canvi, la relació lineal VO_2-T_{MT} calculada a partir de la taula de Zuntz de la despesa calòrica (Zuntz, 1901) és de 12,4 ml/min/watt i l'equivalent calòric del VO_2 en situació estable o steady-state, de 4,85-5 kcal/L VO_2 en el QR=0,84-1, o calculada a partir de l'estudi de Wasserman (2005), representa en ambdós casos un 24% de l'eficiència del T_{MT} (Wasserman & Whipp, 1975)²⁴.

La mesura de l'eficiència del T_{MT} del 30% representa un valor estandarditzat en condicions controlades i amb exercicis relativament simples. Però en la pràctica esportiva aquest valor varia, perquè les condicions de mesurament de l'entrenament i de la competició són incontrolables i els exercicis complexos. De tota manera, en qualsevol condició de T_M l'eficiència del T_{MT} té poca variació percentual i la transcendència de la mesura del T_M és poc significativa. Sembla encertat utilitzar el valor percentual d'un 24% per a la valoració de la quantitat T_{MT} a partir del T_M . Però cal recordar que l'eficiència del T_{MT} no es veu afectada per l'edat, el sexe o la preparació física, com s'ha assenyalat prèviament. El VO_2 , que necessiten els grups musculars durant la pràctica esportiva, queda determinat per la quantitat de T_M realitzat i el pes corporal de l'esportista.

B) La potència metabòlica

P_{MT} d'un moviment és la major quantitat d'energia química interna de l'organisme transformada en calor i T_{MT} desenvolupat per l'interval de temps invertit (dt) en realitzar-lo:

$$P_{MT} = \frac{T_{MT}}{dt}$$

23 S'anomena steady-state (situació estable) a partir del moment, que s'arriba a una fase, en què el VO_2 s'estabilitza (equilibri entre el VO_2 aportat i la despesa energètica en un exercici físic o psicofísic d'intensitat moderada i constant).

24 La contracció muscular és poc eficient alhora de transformar T_{MT} en T_M només se n'aprofita entre un 24-30% (Wasserman & Whipp, 1975). En condicions de mesurament controlades i exercicis simples l'eficiència del T_{MT} està relativament fixada en un 30%.

TAULA III. Definició d'abreviatures

Magnitud	Símbol	Unitat de mesura	Magnitud	Símbol	Unitat de mesura
Energia	E	joule (J)	Massa	m	quilogram (kg)
Energia mecànica	E_M	joule (J)	Força	F	newton (N)
Energia metabòlica	E_{MT}	joule (J)	Intensitat	I	W, J, kcal
Treball	T	joule (J)	Repetició	R	nombre natural
Treball mecànic	T_M	joule (J)	Sèrie	S	nombre natural
Treball metabòlic	T_{MT}	joule (J)	Volum	V	m, km, R, S
Potència mecànica	P_M	watt (W)	Quilocaloria	E_{MT}	kcal
Potència metabòlica	P_{MT}	watt (W)	Consum d'oxigen	VO_2	ml/min
Desplaçament	Δx	metre (m)	Quocient respiratori	QR	--
Longitud (distància)	dx	metre (m)	Trifosfat d'adenosina	ATP	kcal/mol
Temps	t	segon (s)	Difosfat d'adenosina	ADP	kcal/mol
Interval de temps	dt	segon (s)	Energia cinètica	E_c	joule (J)
Velocitat	v	m/s	Energia potencial elàstica	E_{pe}	joule (J)
Acceleració	a	m/s ²	Energia potencial gravitacional	E_{pg}	joule (J)

Però, si el T_{MT} és constant, la fórmula és més simple:

$$P_{MT} = \frac{T_{MT}}{t}$$

Mesurament del treball metabòlic i la potència metabòlica

L'execució d'un exercici genera una quantitat de T_{MT} i també T_M . Tal com s'ha explicat anteriorment, la valoració d'aquesta quantitat de T_{MT} es mesura des del resultat del T_M , que representa un 24% de l'eficiència del T_{MT} , obtingut d'una forma indirecta del consum d'oxigen (VO_2) a partir de la càrrega realitzada. La se-

güent fórmula matemàtica expressa el mesurament del T_{MT} i la P_{MT} :

$$T_{MT} = \frac{T_M}{24\%} \quad P_{MT} = \frac{P_M}{24\%}$$

CONCLUSIONS

Només un 24% de l'energia metabòlica transferida a la contracció muscular es transforma en energia mecànica i genera força muscular amb la finalitat de transformar-se en un T_M i T_{MT} efectiu. La resta, un 76% de l'energia metabòlica, es transforma en calor. En funció del temps que dura aquesta contracció (depèn de la velocitat i el ritme d'execució del movi-

ment), la força muscular es manifestarà com un T_M de resistència a la força, quan l'exercici s'executa a poca velocitat, i com un T_M de força explosiva, quan l'exercici s'executa a màxima velocitat. La velocitat és la variable més important alhora de valorar el tipus de sessió d'entrenament i la quantitat de T_M i T_{MT} . La despesa energètica produïda per aquesta quantitat de T_M i T_{MT} es mesura en quilocalories (kcal) i la quantitat de T_M i T_{MT} per unitat de temps (P_M i P_{MT} respectivament) es mesura en watts (W). En la pràctica, la mesura de la P_M i P_{MT} permet una dosificació racional de la càrrega, un T_M i T_{MT} més eficaç, i elaborar una programació individualitzada de les sessions d'entrenament amb la finalitat d'optimitzar el rendiment de l'esportista.

La força muscular i la velocitat són inversament proporcionals. La velocitat determina una menor o major implicació mecànica de l'exercici i la força muscular, una major o menor implicació metabòlica. En les sessions d'entrenament la mesura i el control d'aquests dos paràmetres, dirigits per un comportament psicomotor, condicionarà que l'execució de l'exercici sigui tècnicament correcta i prou eficient, com perquè en el camp tàctic s'assoleixi el rendiment desitjat.

També en el àmbit de la rehabilitació funcional i la readaptació a l'entrenament és aconsellable dosificar racionalment la càrrega per assolir un T_M i T_{MT} més eficaç. La rehabilitació funcional i la readaptació a l'entrenament no deixen de ser un entrenament, entès com a procés de condicionament psicofísic amb el propòsit de millorar el rendiment físic i intel·lectual. En canvi, l'entrenament esportiu és un procés psicopedagògic interdisciplinari de preparació psicofísica de l'esportista amb l'objectiu de millorar el seu comportament psicomotor i d'aconseguir el màxim rendiment en la competició.

BIBLIOGRAFIA

1. Gibala MJ, Little JP, Essen vanM, Wilkin GP, Burgomaster KA, Safdar A, Raha S, Tarnopolsky MA. Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *J Physiol*. 2006;575:901-911.
2. Goldspink G. Cellular and Molecular Aspects of Adaptation in Skeletal Muscle. Strength and power in sport. Ed. P. Komi. Blackwell Scientific Publication, London, 1992. pp. 211-229.
3. González Badillo JJ, Gorostiaga Ayestarán E. Fundamentos del entrenamiento de fuerza. Aplicación al alto rendimiento deportivo. Ed. Inde, Barcelona, 2002.
4. Häkkinen K. Adaptación neuromuscular al entrenamiento de la fuerza en hombres y mujeres. *PubliCE Standard*. Pid: 252; 2004.
5. Helgerud J, Høydal K, Wang E et al. Aerobic high-intensity intervals improve VO_{2max} more than moderate training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2007;39:665-671.
6. Izquierdo Redín M Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte. Ed. Médica Panamericana, S/A, Madrid, 2008.
7. Kraemer WJ, Fleck SJ, Deschenes M. Exercise physiology corner: A Review: Factors in exercise prescription of resistance training. *National Strength and Conditioning Association Journal*. 1988;10(5):36-42.
8. Mirallas JA. El movimiento deportivo. Teoría general. Ed. Ergon, Barcelona, 2007. p. 94.
9. Tous Fajardo J. Nuevas tendencias en fuerza y musculación. Ed. Ergo, Barcelona, 1999. pp. 28-33.
10. Wasserman K, Hansen JE, Sue D, Stringer W, Whipp BJ. Principles of Exercise Testing & Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications, 4th Ed. Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins, 2005. p. 18.
11. Wasserman K, Whipp BJ. Exercise Physiology in Health and Disease. *Am Rev of Respir Dis*. 1975; 112(2):219-49.
12. Whipp BJ, Wasserman K. Efficiency of muscular work. *J Appl Physiol*. 1969;26:644.
13. Zintl F. Entrenamiento de la resistencia. Ediciones Martínez Roca, Barcelona, 1991, p.27.
14. Zuntz N. Pflügers. *Arch Physiol*. 1901;83:557.

