



**RELACIÓN ENTRE LA RIGIDEZ VERTICAL EFECTIVA Y EL VO<sub>2</sub> A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARRERA SOBRE CINTA.**

Fernando López Mangini  
Carlos Gabriel Fábrika

**RESUMO**

*O objetivo deste estudo foi analisar a relação entre a rigidez vertical e VO<sub>2</sub>. Cinco indivíduos (idade média: 20,0 ± 1,58 anos, massa: 70,90 kg ± 3,47) correram em velocidade de transição de carreira e velocidade em que a literatura estabelece que os músculos começam a trabalhar predominantemente em forma isométrica (13 km/h). A rigidez foi estimada pelo cálculo de K<sub>vert</sub> correspondente à relação entre a aceleração máxima e o deslocamento vertical do centro de massa durante a fase de contato. O VO<sub>2</sub> foi determinada a partir da frequência cardíaca. Os valores obtidos para as duas variáveis em cada velocidade, foram comparados usando o teste t para medidas emparelhadas. A correlação entre as variáveis para cada velocidade foi avaliada utilizando o teste de correlação de Pearson. Ambas as variáveis apresentaram diferença significativa (p < 0,05). Para a velocidade de transição foi observada uma correlação de r = 0,77, enquanto a 13 km/h foi obtido um r = 0,42. Estes resultados são consistentes com trabalhos anteriores onde foi estabelecido que existe um aumento na rigidez e VO<sub>2</sub> com o aumento da velocidade e sugerem a existência de importantes mudanças na forma em que o músculo trabalha em cada velocidade.*

**ABSTRACT**

*The purpose of this study was to analyze the relationship between vertical stiffness and VO<sub>2</sub>. Five individuals (mean age: 20.0 ± 1.58 yr old, mass: 70.90 ± 3.47 Kg) ran at two different velocities: gait transition speed and the speed at which according to previous studies, muscles begin to work mainly isometrically (13km/h). The stiffness was estimated by calculating K<sub>vert</sub>, corresponding to the ratio between maximum acceleration and vertical displacement of the center of mass during the contact phase using image recordings. The VO<sub>2</sub> was estimated from the heart rate. Furthermore, values obtained for both variables at each speed were compared using a t test for paired measures. Also, Pearson correlation test was implemented to correlate variables at each speed. As a result, both variables showed significant differences (p < 0.05). For the gait transition speed the correlation was r = 0.77 while at 13 Km/h was r = 0.42. Thus, these results are consistent with previous studies that state that there is an increase in stiffness and VO<sub>2</sub> while increasing speed, suggesting the existence of important variations in the way muscles work at each speed.*

**RESUMEN**



*El propósito de este estudio fue analizar la relación de la rigidez a nivel de miembros inferiores y  $VO_2$ . Cinco individuos (media de edad:  $20,0 \pm 1,58$  años y masa:  $70,90 \pm 3,47$  Kg) corrieron a velocidad de transición marcha–carrera y a la velocidad a la cual según la bibliografía los músculos comienzan a trabajar predominantemente en forma isométrica (13km/h). La rigidez se estimó mediante el cálculo de  $K_{vert}$  que corresponde al cociente entre aceleración máxima y desplazamiento vertical del centro de masa durante la fase de contacto a partir de registros de imágenes. El  $VO_2$  se determinó a partir de la frecuencia cardíaca. Los valores obtenidos para ambas variables en cada velocidad se compararon mediante un test de t de medidas pareadas. Se estudió la correlación entre variables para cada velocidad mediante el test de correlación de Pearson. Ambas variables presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Para la velocidad de transición la correlación mostro un  $r = 0,77$  mientras que a 13Km/h se obtuvo un  $r = 0,42$ . Estos resultados concuerdan con antecedentes donde se establece que existe un aumento de rigidez y  $VO_2$  al aumentar la velocidad y sugieren la existencia de cambios importantes en la forma de trabajo muscular en cada velocidad.*

## **INTRODUCCIÓN:**

Los elementos elásticos que forman parte de los miembros inferiores (tendones, ligamentos y musculo) contribuyen a minimizar el costo metabólico durante la carrera (CAVAGNA, 1975; ALEXANDER, 1988; FARLEY, 1996). Esa tarea depende de la rigidez de estas estructuras, la cual se puede estimar a través de cálculos basados en el modelo masa-resorte (BLICKHAN, 1989; MC MAHON; CHENG, 1990), donde los componentes de la fórmula son básicamente el pico de fuerza vertical y la deformación del cuerpo en cuestión. Dicho modelo es una simplificación de lo que sucede en la realidad ya que los elementos elásticos de los miembros inferiores están representados por un resorte no amortiguado unido a una masa puntual la cual esquematiza la masa total del cuerpo. Una de las formas de estimación más utilizadas con base en ese modelo es la rigidez vertical del centro de masa ( $K_{vert}$ ) la cual refleja la rigidez efectiva del cuerpo como un sistema (BRUGHELLI; CRONIN, 2008). A su vez, la rigidez varía con el grado de actividad y capacidad de fuerza de los cuerpos elásticos (CE) (HERZOG, 2000) y estos aspectos están asociados con la velocidad de carrera así como con el costo y economía de la carrera (FISHER, 2010).

Para la evaluación del costo y economía de carrera, la determinación del consumo de oxígeno constituye una buena estimación cuando la carrera es de baja velocidad (MACINTOSH; ALLEN, 2000). El  $VO_2$  puede ser cuantificado directamente mediante dispositivos que midan el intercambio gaseoso o puede ser estimado indirectamente a través de la frecuencia cardíaca utilizando abordajes teóricos como la fórmula de Karvonen (KARVONEN, 1957). Este método indirecto cuenta con la ventaja de no afectar la mecánica de la carrera dado que no requiere la colocación de equipamiento sobre el individuo, resultando una buena opción en planteos donde se pretende relacionar la economía con la rigidez de miembros inferior.

Estudios anteriores han establecido que, tanto  $K_{vert}$  como el  $VO_2$  están relacionados con la economía de carrera.  $K_{vert}$  está vinculado con el grado de activación muscular y con la capacidad de fuerza de los CE (HERZOG, 2000). Por su parte, a bajas velocidades de carrera, el porcentaje de  $VO_2$  al cual se está trabajando es una medida de la restitución de ATP a nivel muscular, lo que también depende del grado de



ativación muscular y la capacidad de fuerza de los CE (MACINTOSH; ALLEN, 2000). El análisis conjunto de estos parámetros mecánicos y fisiológicos puede contribuir a entender mejor el comportamiento de las estructuras musculares durante la carrera a bajas velocidades.

El objetivo de este estudio fue analizar la relación entre  $K_{vert}$  y el  $VO_2$  en dos velocidades bajas de carrera a los efectos de discutir como estos parámetros afectan la economía de carrera.

## **METODOLOGÍA:**

### **Participantes**

Una población de cinco atletas velocistas altamente entrenados de sexo masculino (media de edad:  $20,0 \pm 1,58$  años y masa:  $70,90 \pm 3,47$  Kg) participaron voluntariamente de este estudio. Previo al protocolo experimental, los individuos firmaron un consentimiento informado el cual fue aprobado por el Comité de Ética de la Facultad de Medicina de la Universidad de la República, Uruguay. En dicho consentimiento se detallaron los procedimientos experimentales, los posibles riesgos asociados y los potenciales beneficios de participar en este estudio

### **Protocolo experimental**

Los individuos fueron preparados en el Gimnasio de Fisiatría del Hospital de Clínicas. Previo a cada experimento se colocaron sobre los individuos 18 marcadores reflexivos en distintos puntos anatómicos con el fin de identificarlos para su posterior digitalización. Los puntos seleccionados fueron: quinto metatarsiano, maléolo lateral, cóndilo femoral, trocánter mayor, acromion, esfenoides, epicóndilo externo del húmero, apófisis estiloides del radio y la cabeza del tercer metacarpiano. Todos los marcadores consistieron en esferas, hechas de poliamida con 1 cm de diámetro.

Cada sujeto realizó una carrera en cinta de diez minutos a dos velocidades diferentes, la velocidad de transición marcha carrera y a 13km/h. la velocidad de transición fue calculada considerando un número de Freud de 0,5 y tomandocomo longitud del miembro inferior la altura del piso al trocanter (SAIBENE; MINETTI, 2003). Por su parte la velocidad de 13km/h fue seleccionada debido a que aproximadamente a partir de allí los músculos comienzan a trabajar predominantemente en forma isométrica (FISHER, 2010). Se realizaron registros de imágenes con 4 cámaras de video DCR-H28E sincronizadas a una frecuencia de 25 Hz durante 5 minutos a cada velocidad. Estas fueron dispuestas formando ángulos de 90 grados entre sí lo que permitió filmar con dos cámaras a los individuos desde cada plano sagital (derecho e izquierdo) de manera de poder hacer una reconstrucción tridimensional.

Se midió la frecuencia cardíaca basal en ambas velocidades con un pulsómetro Nike modelo triax c8.

### **Procesamiento de Datos**

Las imágenes obtenidas por las cámaras fueron capturadas con el programa Virtual Dub-MPEG2.1.6.19© (Software libre). Con las cuatro cámaras sincronizadas se procedió al establecimiento de la secuencia a digitalizar. Para ello se utilizó el programa Dvideow 6.3 (*Digital for Video for Biomechanics Windows 32*



*bits*, Laboratorio de Instrumentación para Biomecánica Universidad de Campinas). Se definió el inicio de una secuencia de 20 pasos en el cuadro en que el pie derecho del individuo hace contacto con el piso y el final de la secuencia en el cuadro en que el mismo pie vuelve a hacer contacto con el piso. Una vez establecida una misma secuencia en las cuatro cámaras se procedió a la digitalización. Por cada secuencia digitalizada se guardaron cuatro archivos de digitalización, uno por cada cámara, y ellos fueron usados posteriormente en el proceso de reconstrucción 3D. A partir de las matrices de reconstrucción 3D se determinaron las coordenadas de la posición vertical del CM en Matlab 7.0<sup>®</sup> (*Mathworks, Inc.*) considerando las coordenadas de los centros de masas parciales de los pies, piernas, muslos, manos, antebrazos, brazos, tronco y cabeza. Conociendo la posición del CM en cada paso, se procedió a calcular la aceleración vertical del mismo derivando dos veces la posición respecto del tiempo. A partir de la curva de aceleración se determinó el tiempo de contacto efectivo para cada apoyo (CAVAGNA, 2006). Dicho tiempo se utilizó para obtener el desplazamiento máximo del CM durante el contacto efectivo (Sce).

La rigidez vertical efectiva ( $K_{\text{vert}}$ ) fue determinada por la relación entre el pico de aceleración vertical ( $av_{\text{max}}$ ) y el Sce.

$$K_{\text{vert}} = av_{\text{max}} / \text{Sce}$$

A los efectos de minimizar el error se calculó un valor promedio de  $K_{\text{vert}}$  a partir del cuarto minuto de carrera en cada una de las velocidades consideradas ya que a partir de ese momento la variabilidad del paso disminuye (FISHER, 2010).

La economía de carrera fue estimada a partir del consumo de oxígeno, el cual se determinó en forma aproximada mediante la frecuencia cardíaca considerando la fórmula de Karvonen (KARVONEN, 1957).

$$FC = ((FC_{\text{max}} - FC_{\text{min}}) \times \%) + FC_{\text{min}}$$

Donde FC es la frecuencia cardíaca,  $FC_{\text{max}}$  y  $FC_{\text{min}}$  son la frecuencia cardíaca máxima y mínima respectivamente y % es el porcentaje de  $VO_2$  al cual se está trabajando.

Análisis de los datos.

Para cada velocidad de carrera se evaluó el ajuste de los datos de  $K_{\text{vert}}$  y  $VO_2$  a una distribución normal a través de la prueba de Shapiro-Wilks.

Se realizaron test de t para medias pareadas para analizar las diferencias para cada variable considerada entre ambas velocidades.

Finalmente se realizó el test de correlación de Pearson entre los valores de  $K_{\text{vert}}$  y  $VO_2$  obtenidos para cada velocidad.

Todos los análisis se efectuaron en el programa SPSS Statistics 17.0.



## RESULTADOS:

**Tabla 1:** Esta tabla presenta los valores de  $K_{\text{vert}}$  y  $VO_2$  (media y desvío estándar) resultados de las pruebas de t pareadas para una velocidad respecto a otra ( $p < 0,05$ ).

Variable/velocidad	Velocidad de transición marcha carrera	Velocidad 13km/h	p
$VO_2$ (%)	59,4±7,5	83,5±4,5	0,001
$K_{\text{vert}}$ (1/s <sup>2</sup> )	161,2±31,2	203,4±28,9	0,002

**Tabla 2:** Esta tabla muestra los resultados de las correlaciones de Pearson (r) entre  $K_{\text{vert}}$  y  $VO_2$  para cada velocidad.

Velocidad	r
Transición marcha-carrera	0,77
13km/h	0,42

## DISCUSIÓN:

Hasta el momento son escasos los trabajos donde se aborda el estudio conjunto entre la rigidez de miembros inferiores y el  $VO_2$  (ej, MC MAHON; GREENE, 1979). En el presente estudio, se realiza este abordaje a los efectos de discutir respecto a la relación de la mecánica muscular y la economía de carrera en dos velocidades diferentes.



Los valores de  $K_{\text{vert}}$  encontrados en este trabajo para velocidad de transición marcha carrera ( $161,2 \pm 31,2$ ) y para 13 Km/h ( $203,4 \pm 28,9$ ) estuvieron levemente por debajo de los valores habitualmente reportados en la bibliografía (FISHER, 2010). Consideramos que esa diferencia posiblemente esté asociada a que los registros en este estudio fueron realizados en *treadmill*, de forma que las estimaciones de  $K_{\text{vert}}$  en realidad incluyen la rigidez de la superficie (KERDOK, *et al.*, 2002). No obstante, se encontraron diferencias significativas en los valores de  $K_{\text{vert}}$  con el aumento de velocidad ( $p=0,002$ ) que concuerdan con lo discutido en trabajos anteriores (KERDOK, *et al.*, 2002; FISHER, 2010;) en los cuales se establece que la rigidez de la pierna aumenta al aumentar la velocidad.

En cuanto a los valores de  $VO_2$  estimados con la fórmula de Karvonen, también se observaron diferencias significativas entre velocidades ( $p=0,001$ ) lo que sugiere que el gasto metabólico neto es mayor a 13 km/h. Si bien ambas variables estudiadas aumentaron significativamente, su nivel de asociación cambió con la velocidad, siendo alto en velocidad de transición marcha carrera ( $r=0,77$ ) y bajo cuando los individuos corrieron a 13Km/h ( $r=0,42$ ). Estas diferencias podrían estar indicando un cambio significativo en el sistema de restitución de ATP que predomina en cada velocidad.

El aumento de la rigidez observado al aumentar la velocidad, en conjunto con el aumento de  $VO_2$  sugieren que cuando los individuos corren a 13 Km/h los componentes contráctiles del músculo se encuentran más activos y trabajando en un rango de longitud diferente que a velocidad de transición marcha-carrera. Mientras que el cambio en el nivel de asociación entre  $K_{\text{vert}}$  y  $VO_2$  observado al aumentar la velocidad de carrera podría reflejar que el sistema energético predominante dejó de ser el aeróbico y comienza a tener una mayor participación el sistema láctico debido a que los valores de  $VO_2$  están cercanos al umbral láctico dado el aumento en la activación muscular. Este resultado sugiere que existe una relación entre los parámetros mecánicos y fisiológicos estudiados y que dicho vínculo está principalmente asociado al grado de activación muscular.

## REFERENCIAS:

- ALEXANDER, *Elastic mechanisms in animal movement*. Cambridge: 1988.
- BLICKHAN, R. *The spring-mass model for running and hopping*. *J Biomech*, v.22, n.11-12, p.1217-27, 1989.
- BRUGHELLI, M.; CRONIN, J. *Influence of running velocity on vertical, leg and joint stiffness: modelling and recommendations for future research*. *Sports Med*, v.38, n.8, p.647-57, 2008.
- CAVAGNA, G.A. *Force platforms as ergometers*. *J. Appl. Physiol.*, v.39, n.1, p.174-179, 1975.
- CAVAGNA, G.A. *The landing-take-off asymmetry in human running*. *J. Exp. Biol.*, v.209, n.20, p.4051-4060, 2006.
- FARLEY, C. T.; Gonzalez, O. *Leg stiffness and stride frequency in human running*. *J Biomech*, v.29, n.2, p.181-6, 1996.



FISHER, *Análise da Mecânica da Corrida com e sem o efeito da Fadiga*. 2010. tese (Maestrado) - Ciências do Movimento Humano, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

HERZOG, W. *Cellular and Molecular Muscle Mechanics*. In: *Skeletal Muscle Mechanics: From Mechanisms to Function*. (edited by W Herzog), John Wiley & Sons, Ltd., 2000.

KARVONEN, MJ.; KENTAL, E.; MUSTALA, O. *The effects of on heart rate a longitudinal study*. *Ann Med Exp Fenn*, v.35, n.3, p.307-15, 1957.

KERDOK, A. E.; BIEWENER, A. A., *et al*. *Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses*. *J Appl Physiol*, v.92, n.2, p.469-78, 2002.

MACINTOSH, B. R.; ALLEN, D.G. *Contractile Changes and Mechanisms of Muscle Fatigue*: In *Biomechanics and Biology of Movements* (edited by B. m. Nigg, B.R. MacIntosh, J. Mester), Champaign Il, Human Kinetics, 2000.

MC MAHON, T. A.; CHENG, G. C. *The mechanics of running: how does stiffness couple with speed?* *J Biomech*, v.23, n.1, p.65-78, 1990.

SAIBENE, F.; MINETTI, A. E. *Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans*. *Eur J Appl Physiol*, v.88, n.4-5, p.297-316, 2003.

Contacto:

Fernando López

Email: [fernandolopezmangini@gmail.com](mailto:fernandolopezmangini@gmail.com)

Dirección: Hector Miranda 2403bis/201

Telefono: 0059899339190

Gabriel Fábrika

Email: [cgfabrica@gmail.com](mailto:cgfabrica@gmail.com)

Telefono: 0059895373237