

Article

Convalidación de una Prueba Máxima de Tiempo Límite a Velocidad Máxima Aeróbica y a VO2 Max

Time to Exhaustion Test at Maximum Aerobic Speed and VO2 Max

Veronique Billat¹, Jean Cyril Renoux¹, Jacques Pinoteau², Bernard Petit² y Jean Pierre Koralsztein²

¹Laboratorio Staps, Universidad de París XII..

²Centro de Medicina Deportiva del CCAS de París (Francia).

RESUMEN

El objeto de esta investigación es la medida y la valoración del tiempo de agotamiento (Tiempo límite, Tlim) en la carrera a velocidad máxima aeróbica (VMA) y la valoración de su reproducibilidad. Han sido examinadas, también, las relaciones entre este Tlim y otros parámetros indicativos de la capacidad aeróbica. Durante la prueba de determinación del Tlim a la VMA, ha sido también medida la evolución de los parámetros cardiocirculatorios y ventiladores. La muestra, objeto de la investigación, estaba constituida por 12 sujetos, corredores de fondo, seleccionados durante los campeonatos franceses de Maratón, los cuales han realizado la prueba de determinación del Tlim a la VMA sobre una cinta rodante. Ocho de estos corredores han repetido la prueba con separación de una semana. No se hallaron diferencias significativas (para el umbral $\alpha=0.05$) entre el Tlim medido la primera semana (6 min 44 s, \pm 1 min 41 s) y el Tlim medido la segunda semana (6 min 25 s, \pm 1 min 55 s). Mientras la frecuencia cardiaca mantiene estable el VO2, la VE y la frecuencia respiratoria aumentan sensiblemente durante el último minuto de la carrera, antes del cese a la mitad de la prueba (Tlim -1 min) ($p= 0,05$; $0,001$; $0,02$). No se ha hallado correlación significativa entre los valores del Tlim a VMA y otros parámetros de la realización de la carrera sobre larga distancia, tales como el VO2 max ($r = 0,17$); la velocidad máxima aeróbica ($r = 0,37$); la economía de la carrera ($r = 0,04$) y el "índice de resistencia" ($r = 0,11$). El Tlim a la VMA, sin embargo, es correlativo al umbral anaeróbico, expresado en % del VO2 max, y correspondiente al comienzo de la acumulación del lactato (3-5 mmol·l⁻¹) en función de la velocidad.

Palabras Clave: time to exhaustion, mas, vo2 max, long distance running

ABSTRACT

This study focuses on the measurement of running time to exhaustion (limit time, Tlim) at maximal aerobic speed (MAS) and on a reproducibility assessment. The relationships between Tlim and other aerobic capacity parameters were also examined. During the test for the calculation of Tlim at MAS the progress followed by the cardiocirculatory and ventilatory parameters was also evaluated. The sample group for the study consisted of 12 long-distance runners, selected during the French mini-marathon championships, who performed the test on the treadmill. Eight of these subjects repeated the test

one week later. No significant difference (at the $\pm \alpha = 0,05$ threshold) was found between the Tlim values measured the first week (6 min 44 s, ± 1 min 41 s) and the second week (6 min 25 s, ± 1 min 55 s). While the heart rate remained stable, during the last minute of running before the athlete gave up the VO₂, VE, and the breathing rate increased noticeably with respect to the halfway point of the test (Tlim₁) ($p = 0,05$; 0,001; 0,02). No significant correlation was found between the value of the Tlim and MAS and other performance indicators for long distance running, such as VO₂ max ($r = 0,17$); maximum aerobic speed ($r = 0,37$); running economy ($r = 0,04$) and the "endurance index" ($r = 0,11$). There was however a correlation between Tlim at MAS and the anaerobic threshold, expressed as the percentage of VO₂ max corresponding to the point at which lactate begins to build up (35 mmol·l⁻¹) depending on the running speed, measured using Rusko and Aunola's protocol ($r = 0,58$) ($n = 12$). The Tlim at MAS seems therefore to be a supplementary criterion for the evaluation of aerobic qualities, and is useful in estimating the athlete's work capacity at VO₂ max, when included in training programs for medium and long distance races.

Keywords: tlim, vma, vo2 max, carrera de larga distancia

INTRODUCCIÓN

La realización de una carrera de media y larga distancia puede ser representada por el tiempo empleado para cubrir una distancia dada. Por consiguiente, la realización óptima requiere el mantenimiento de la velocidad más elevada posible, respecto de la duración de la carrera. Para cualquier velocidad, el atleta debe estar en condiciones de mantener un tiempo de carrera que aquí llamaremos Tiempo límite (Tlim). Ya en el 1927, Hill realizó un modelo de la relación potencia-duración del ejercicio, observando en sí mismo, a la edad de 35 años, la velocidad asociada al logro de un techo del consumo máximo de oxígeno previsto (16 km·h⁻¹), que pensaba podría sostener por "alrededor de una décima de minuto" (Hill, 1927). Desde entonces, muchos autores están interesados en esta relación, de tipo exponencial o hiperbólica, según el modelo que relaciona la potencia (o velocidad) con la duración del ejercicio (Aunola y otros, 1990; Gleser, Vogel, 1973; Housh y otros, 1989; Monod, Scherrer, 1965; Moritani y otros, 1981; Péronnet y otros, 1987; Poole y otros, 1988). En esta investigación ha sido extrapolado o investigado realmente, el Tiempo límite o la potencia asociada al VO₂ max (Camus y otros, 1988; Hill, 1927; Housh y otros, 1989; Lacourt y otros, 1991; McLellan, Cheung, 1992; Padilla y otros, 1992; Pepper y otros, 1992; Péronnet y otros, 1987; Ramsbottom y otros, 1992) (véase la Tabla 1).

Ninguno de estos estudios, sin embargo, ha verificado la reproducibilidad y la sensibilidad de este valor a velocidad máxima aeróbica (VMA) como parámetro predictivo del rendimiento y de las cualidades aeróbicas. La finalidad de esta investigación, ciertamente, ha sido el medir, en tiempo real, este Tiempo límite a la VMA y al VO₂ max. sin extrapolaciones, sobre una cinta rodante, con el control de la velocidad cada minuto, la anotación continua de los cambios gaseosos y de la frecuencia cardiaca. Además de su reproducibilidad a una semana vista, el Tlim a VMA ha sido medido en relación con otra variable de la cualidad aeróbica y del rendimiento de carrera sobre media y larga distancia:

1. el VO₂ max (ml·min⁻¹·kg⁻¹);
2. el Costo energético de la carrera (EC) (ml·kg⁻¹·km⁻¹);
3. la Fracción de consumo máximo de oxígeno (FVO₂ max) expresada como % del VO₂, medida al umbral anaeróbico, considerada esta última como el punto en el que empieza la acumulación del ácido láctico durante la prueba con cargas en aumento (Aunola, Rusko, 1984);
4. el Índice de resistencia (IR) (Péronnet y otros, 1987).

TÉCNICAS Y PROTOCOLOS DE INVESTIGACIÓN

Sujetos

La población objeto de la investigación estaba compuesta por 12 corredores de segundo y tercer nivel internacional, de una edad media de 29,5 ($\pm 3,4$) años. Sus características físicas eran:

- peso 68,4 kg ($\pm 6,2$);
- estatura 177 cm ($\pm 4,3$)

Los sujetos, todos voluntarios, fueron seleccionados en base a su resultado en la media maratón (21,1 km): su velocidad

media sobre cierta distancia (V21) debía ser superior o igual a 17 km·h⁻¹, que corresponde al criterio para la admisión en el Campeonato nacional de la especialidad (resultado obtenido durante la temporada actual) [1994, NdT]. Su velocidad media sobre la distancia de 3000 m. y de los 21,1 km era, respectivamente, igual a 20,36 km·h⁻¹ (± 0,58) y 17,96 km·h⁻¹ (± 1,03). Muy motivados, en lo que se refiere a la valoración de su capacidad física, los sujetos han realizado tres pruebas con un intervalo de una semana, observando, durante el periodo entero, una disminución de su entrenamiento en lo que se refiere a la cantidad de los kilómetros recorridos semanalmente. Los resultados de las pruebas se les entregó a cada sujeto, una semana después de la última prueba, unidos a un programa de entrenamiento personalizado, sobre la base de sus resultados y a los objetivos de la temporada.

Todas las pruebas han sido realizadas en el laboratorio, sobre una cinta rodante Gymrol 1800. En cada una de las tres pruebas, la inclinación de la cinta era nula y la velocidad estaba controlada cronometrando el tiempo de rodamiento de 50 vueltas de la cinta rodante. Los cambios gaseosos eran medidos en la boca, a través del análisis, en cada uno de los sujetos, continuamente, del aire inspirado, mediante un analizador automático de gas, modelo Jaeger Esosprint, que calculaba la media sobre los 15 s. La frecuencia cardiaca (Fc en b·min⁻¹) se registraba continuamente, mediante un osciloscopio Siemens y de un frecuencímetro Sportester PE 3000. Los parámetros registrados y considerados en este trabajo, son los siguientes

- frecuencia cardiaca (Fc en latidos·min⁻¹);
- consumo de oxígeno (VO₂ en ml·min⁻¹·kg⁻¹);
- caudal ventilatorio (VE en l·min⁻¹);
- producción de anhídrido carbónico (VCO₂ en l·min⁻¹);
- frecuencia respiratoria (FR en ciclos al minuto).

La muestra de sangre capilar se recogía en la punta de los dedos y la lactocidemia (mmol·l⁻¹) se medía a través de micro-método, utilizando un analizador automático, modelo Bioblock.

Los sujetos han completado dos o tres (en el caso de 8 sujetos) protocolos de investigación con un intervalo de una semana.

Determinación del VO₂ max, de la velocidad máxima aeróbica (VMA) y del umbral anaeróbico (UAN)

En la primera prueba ha sido utilizado un protocolo continuo con aumento de la velocidad hasta la máxima Fc teórica (220 latidos- la edad) de 2 y sucesivamente de 1 km·h⁻¹ por cada paso, cada uno con una duración de tres y sucesivamente de dos minutos (Astrand, Ryhming, 1954). La velocidad inicial era de 12 km·h⁻¹ (3,33 m·s⁻¹). El consumo de oxígeno (VO₂) se consideraba máximo, si se satisfacían, al menos, dos de los siguientes criterios:

- el logro de un techo del VO₂, a pesar de un aumento de la velocidad;
- un cociente respiratorio (R) igual, al menos, a 1,1;
- una frecuencia cardiaca no inferior al 10 % de la frecuencia máxima cardiaca teórica.

La velocidad máxima aeróbica se definía como la velocidad mínima de carrera asociada al VO₂ max. El umbral anaeróbico (UAN) venía determinado mediante la toma de una muestra de sangre venosa de la yema de los dedos en reposo y durante los últimos 30 s. de cada nivel de velocidad, de tal manera que el diseño de la curva de la lactedecemia estuviera en función de la velocidad de la carrera. El UAN venía determinado por la observación, por parte de dos investigadores, independientemente el uno del otro, de la curva del lactato/VO₂. El UAN era individualizado en el momento en que comenzaba la acumulación del lactato, normalmente alrededor de valores de lactedecemia iguales a 3 5 mmol·l⁻¹ según los sujetos y siguiendo el método de Aunola y Rusko (1984). Este método ha sido elegido porque permite una valoración individual del umbral lactida, tenido en cuenta el carácter del protocolo de investigación que procedía por niveles sucesivos de la duración de sólo 3 minutos. El UAN ha sido expresado como fracción del VO₂ max (% VO₂ max o FVO₂ max); el costo energético o la economía de carrera (EC) ha sido evaluado como la cantidad de oxígeno consumido para una velocidad establecida (di Prampero y otros, 1986) y expresada en ml·kg⁻¹·km⁻¹. La velocidad de referencia debe ser inferior a la velocidad que conlleva el comienzo de la acumulación de ácido láctico, identificada como la velocidad del umbral anaeróbico. Más allá de esta velocidad, el aumento de la participación del metabolismo anaeróbico conlleva, si tenemos en cuenta solamente el consumo de oxígeno, una subvaloración del costo energético del ejercicio. En la población objeto de esta investigación (corre-dores de buen nivel) la economía de carrera ha sido medida a las velocidades máximas submaximales de 14 y 16 km·h⁻¹.

Determinación del Tlim a VO₂ max y a velocidad máxima aeróbica (VMA). Verificación de la economía de carrera durante la fase preliminar de la prueba a VMA

Para determinar el Tlim a la VMA, los sujetos realizan una fase de calentamiento de 20 minutos de duración, al 60 % de la VMA y después tienen que llegar a su VMA en menos de 30 s. El Tlim a VMA, precisamente, era determinado, con un descarte de un segundo, entre el momento en que comienzan a correr a la VMA y del momento de interrupción de la

prueba. Los sujetos son verbalmente motivados a correr hasta el agotamiento, como en una competición, en la que, sin embargo, la andadura es perfectamente regular. La frecuencia cardiaca y los cambios gaseosos (descritos anteriormente) son registrados continuamente durante la prueba, mientras las muestras sanguíneas para medir la lactedemia son tomadas de la yema de un dedo, antes de la fase de calentamiento, después de la fase de calentamiento y después del Tiempo límite, corrido a la VMA. La economía de la carrera se comprobaba durante la fase de calentamiento, carrera a una intensidad igual al 60 % de la VMA (inferior al UAn de esta población de sujetos), por un periodo de tiempo suficientemente largo para obtener un "estado estable" del consumo de oxígeno, pero también, lo bastante breve como para evitar un aumento del VO₂ max, debido a la acumulación de calor endógeno. Al término de este protocolo de ejercicio corrido al 100 % del VO₂ max, se le presentaba al sujeto una escala de valoración de la dificultad del ejercicio, para saber cuál era su percepción global de la dificultad (tasa de percepción del ejercicio RPE) (Borg y otros, 1987).

Repetición de la prueba de determinación del Tlim a velocidad máxima aeróbica y a VO₂ max

Ocho sujetos han repetido la prueba para determinar su Tlim a la VMA y con una semana por el medio, a la misma hora del día (entre las 10 y las 16, según los sujetos).

Determinación del índice de resistencia

El índice de resistencia, IR, al que se considera como un criterio de la capacidad aeróbica, es un valor de la inclinación de la recta de regresión lineal de la fracción de VO₂ max utilizada (% VO₂ max), en función del tiempo de carrera (expresado como logaritmo natural de los minutos: $\ln t$).

Este índice de resistencia representa, ciertamente, la capacidad de mantener una fracción elevada de consumo de oxígeno por duración o distancia máxima posible de carrera. En nuestro caso, si se tiene en cuenta la fracción de VO₂ max mantenida sobre la distancia de 20 Km. El IR se calcula por la inclinación de la recta de la relación % VO₂ max en función de $\ln t$, utilizando la siguiente fórmula:

Donde:

- IR es el índice de resistencia individual, calculado con el tiempo de carrera realmente realizado a la VMA (100 % VO₂ max) y no con el valor estadístico de 7 minutos utilizado, como punto de referencia, por Péronnet y otros (1987);
- t (20 km) es el tiempo de carrera realizado en una competición sobre los 20 km (expresado en minutos);
- % VO₂ max es la fracción de utilización del VO₂ max (FVO₂ max) mantenida sobre la distancia de 20 km; ésta ha sido calculada asumiendo que el costo energético real a la velocidad de competición (media de 17,5 km·h⁻¹), fuera medido durante el primer protocolo de ejercicio sobre la cinta rodante (velocidad = 16 km·h⁻¹).

El porcentaje medio de la cuota de energía surtida por el metabolismo anaeróbico (ANA) referido al volumen total del oxígeno consumido (en litros) durante el tiempo corrido a la VMA, venía calculado por medio del déficit de oxígeno, según el método de Medbo y Tabata (1989).

Tlim a la VMA y resultado obtenido de los sujetos sobre una distancia de 3.000 m. y 20 km.

Las velocidades del 3.000 y de los 20 km. (expresadas en km·h⁻¹), eran las realizadas efectivamente en competición durante el año anterior a la experimentación.

Los cálculos estadísticos

Las medias de los Tlim a la VMA realizados con una separación de una semana (datos emparejados) han sido confrontados utilizando el valor estadístico de la "t" de Student y la prueba de Wilcoxon (Schwartz, 1969).

Para examinar las proporciones que van asociadas, el Tlim a VMA y los otros parámetros de la ejecución y de la capacidad aeróbica han sido calculados de las correlaciones. Para todo el cálculo estadístico el umbral de significatividad se fijó en $P < 0.05$.

RESULTADOS

Determinación del VO₂ max, de la velocidad máxima aeróbica y del umbral anaeróbico

La población analizada resultaba homogénea para lo que se relacionaba con la VMA (21,2 km·h⁻¹; ± 0.94); el VO₂ max

(69,4 ± 3,65 ml·min⁻¹·kg⁻¹); el UAn (80,4 % VO₂ max ; ± 4,8) (n = 12). Los valores individuales y las demás características bioenergéticas se exponen en la Tabla 2.

Valores y reproducibilidad del Tiempo límite a la VMA

Los valores medios del Tlim a la VMA, obtenidos al término de las pruebas efectuadas en la primera semana, eran de 6 min. 34 s. ± 1 min. 44 s., con valores extremos de 4 min. 22 s. y de 9 min. 58 s., además, con una extensión notable igual a 5 min. 36 s. (ver tabla 2). Ninguna diferencia significativa se vió en el Tlim a VMA, de los ocho sujetos que han repetido la prueba después de una semana en las mismas condiciones experimentales (r = 0,865; n = 8) (Figura 1)

.Los valores del VO₂ max registrados al término de la prueba de evaluación del Tlim a VMA, no difieren de manera significativa de los tomados en consideración al término del protocolo triangular de determinación de la VMA y del VO₂ max (p <0,1).

La distancia media recorrida sobre la cinta rodante a VMA durante la prueba de Tiempo límite es de 2.300 m (± 592).

Evolución de los valores del consumo de oxígeno, de la frecuencia cardiaca, de la lactedecemia e de la ventilación durante la prueba del Tlim a la VMA

Durante la prueba del Tlim a la VMA, el VO₂ alcanzaba un techo a un valor no significativamente muy distinto del VO₂ max, después de un periodo de tiempo medio, de 97 s (± 11) calculado gráficamente, proyectando sobre el eje de abscisas el punto de intersección de las dos tangentes a la curva de evolución del VO₂ en función del tiempo de carrera a la VMA.

Aunque la frecuencia cardiaca no difería de manera significativa de la del final del protocolo triangular de determinación del VO₂ max (1 92 latidos·min⁻¹; ±4).

La media de los valores de la lactedecemia, medida 4 minutos después del final de la prueba de Tlim a la VMA, era de 8,9 mmol·l⁻¹ (± 1,1); un valor no significativamente distinto del obtenido 4 minutos después del final de la prueba triangular para la determinación de la VMA y del VO₂ max.

En lo que atañe a la evolución de los parámetros cardiorespiratorios durante la prueba del Tlim a la VMA, la confrontación entre los valores obtenidos en a mitad y los obtenidos al final de la prueba (penúltimo minuto) ha evidenciado que la ventilación (VE en l·min⁻¹) aumenta de manera notable (p < 0,001), así como la frecuencia respiratoria (FR) (p <0,02), mientras que el volumen corriente (Vr) no varia significativamente.

Correlaciones entre el Tlim a la VMA y otros parametros bioenergéticos utilizados para controlar la capacidad aeróbica y para la confrontación con los rendimientos en los 3.000 m y en los 20 km.

Ninguna correlación significativa ha sido obtenida entre el Tlim a la VMA y el VO₂ max (r = 0,17), entre el Tlim a la VMA y la misma VMA (r = - 0,3); y tampoco entre el Tlim a la VMA y la economía de carrera (r=0,41). Además no se ha obtenido ninguna correlación entre el Tlim a la VMA y el índice de resistencia personal (r= 0,1). En cambio, hay una correlación inversa y significativa entre el Tlim a la VMA y el Umbral anaeróbico (UAn) (r= 0,58; p < 0.05) (Figuras 2,3,4,5).

El porcentaje medio de la cuota de energía cubierta por el metabolismo anaeróbico (ANA) es del 10,52 % (±1,7), con una dispersión notable de los valores (intervalos entre 7,3 y 1 3,2 %) El ANA no está significativamente correlacionado al Tlim a la VMA (r = 0,28).

Tlim a la VMA y rendimiento obtenido (velocidad) en 3.000 m y en 20 km.

La velocidad media en 3.000 m y en 20 km, considera-dos como el índice de rendimiento de carrera, representaban, respectivamente, el 96 % (± 6,4) y el 84,6 % (± 4,9) de la VMA. Pero las velocidades que se lograron en los 3.000 m y en los 20 km, no están, sin embargo, correlacionadas a la VMA de esta población, que es ciertamente homogénea respecto de este parámetro (r= 0.20 y 0,19 respectivamente), así como el Tlim a la VMA respecto de la velocidad en los 3.000 m (V 3000) y la de los 20 km (V 20) (Tabla 3).

Los valores del Tlim a la VMA y su reproducibilidad

•El valor medio del Tlim a la VMA está muy próximo al obtenido al final de un calentamiento, efectuado al 57,5 %, durante una investigación anterior, realizada con 10 fondistas (Billat y otros). En este trabajo, el Tlim medio era de 6 min 29 s (± 2 min 5 s.), con valores extremos de 3 min 47 s. y 11 min 30 s. También en este caso, el valor medio del Tlim a la VMA está próximo al utilizado para el cálculo del índice de resistencia (Péronnet y otros, 1987)

Los valores individuales, sin embargo, están amplia-mente distribuidos en torno al valor estándar, estimado por Péronnet,

en 7 minutos. Los valores, del Tlim alrededor del 105 % de la VMA, eran iguales a 5 min 35 s., según los cálculos obtenidos sin fase de calentamiento, por Camus y otros (1988) con 7 sujetos, cuyo valor medio de VO₂ max era de 58 ml·min⁻¹ (± 9).

La ausencia de una diferencia significativa entre los valores medios del Tlim a la VMA y del VO₂ max obtenidos en el intervalo de una semana, nos permite avanzar la hipótesis de que la prueba de determinación del Tlim a la VMA, sea igualmente reproducible como el protocolo triangular de determinación del VO₂ max (Kyle y otros, 198-9).

Es difícil explicar, en el plano fisiológico, las causas que determinan el valor del Tiempo límite en promedio, después de 6 min 30 s. de carrera a la VMA, es decir: la capacidad de resistencia a VMA.

- Los valores elevados, registrados para la ventilación y la frecuencia cardiaca, respectivamente, más allá de 140 l·min⁻¹ y 190 latidos·min⁻¹, podrían estar entre las causas de la limitación en el tiempo del ejercicio, dado que una parte importante del gasto energético y del consumo de oxígeno (en promedio 4,71 min⁻¹; ± 0,2), está a cargo de los músculos cardiorespiratorios (Fairban y otros., 1991; Saltin, Strange, 1992; Powers y otros., 1992). En efecto, la ventilación al final del Tlim a la VMA continúa aumentando en relación al aumento de la frecuencia respiratoria. No se puede, de todos modos, suponer que el Tlim a la VMA, sea condición sólo del logro de un “techo” del VO₂ max, a pesar del aumento de VE.

- El valor medio de la lactacidemia, a 4 minutos del final de la prueba de Tlim a la VMA, no puede explicar el abandono del ejercicio, incluso, si los valores intramusculares sacados del trabajo de Sahlin (Sahlin y colaboradores, 1988), superaban en 6/8 veces los de nuestro trabajo. Sahlin pudo observar, en un hallazgo bióptico del músculo vasto externo, un aumento de la misma proporción (de 5 a 7 veces), de los informes NADH : NAD y lactat-piruvato, al término de una prueba de Tlim a máxima potencia aeróbica y VO₂ max a cicloergómetro. Los valores medios de VO₂ max y de Tlim verificados, eran iguales, respectivamente a 53 ml·min⁻¹·kg⁻¹ y 4 min 48 s. Este último es ligeramente inferior al obtenido en nuestro trabajo al 100 % de VMA con una prueba, pre-cedida de calentamiento, con una población cuyo VO₂ max medio, es superior a 10 ml·min⁻¹·kg⁻¹. Sin embargo, hemos constatado cómo el valor del Tlim a la VMA es independiente del VO₂ max, para aquella parte de población en la que éste está comprendido entre 60 y 75 ml·min⁻¹·kg⁻¹.

En nuestra investigación, el valor medio del porcentaje de gasto energético cubierto por el metabolismo anaeróbico (ANA)(10,2 % ± 1,7), está de acuerdo con los datos publicados en pruebas semejantes de carrera hasta el agotamiento, de esta potencia y duración (Hermanssen, Vaage, 1977; Medbo, Tabata, 1989). Sin embargo, la gran dispersión de los valores (7%), aquí permite hipotetizar que según el sujeto, la prueba asume un carácter anaeróbico más o menos elevado, que para otro sujeto no está en relación con la duración alcanzada a la VMA.

- Además, como en todas las pruebas de esfuerzo hasta el agotamiento de media y larga duración (< 10 s), los resultados de esta prueba de determinación del Tiempo límite a la VMA, dependen necesariamente de la implicación emotiva del sujeto y de su motivación. Pero, también, en el rendimiento registrado en algunas ocasiones de esta experimentación, como en la de la competición, ha sido obtenida una adhesión total, en cuanto a que nuestros sujetos sabían que la precisión de los programas de entrenamiento, en términos de intensidad y duración, dependía del esmero con que se realizara la prueba. Y conseguir el programa de entrenamiento, con las explicaciones específicas, representaba sólo una recompensa a sus esfuerzos.

Aunque es probable que las causas de suspensión del ejercicio cambien de un sujeto a otro, queda el hecho de que, tanto el valor de Tlim a la VMA, como el conjunto de los parámetros cardiocirculatorios, respiratorios y el nivel de lactacidemia, son reproducibles en el mismo sujeto. Y esto, a pesar de que los atletas hayan estado sin conocer los resultados de la primera semana, para evitar la posibilidad de que se propusieran superarlos. En la escala de Borg (Borg y otros, 1987), todos los corredores han evaluado, luego, la intensidad “muy difícil”, correspondiente a 18 puntos sobre los 20 disponibles, aunque esto no puede ser considerado igual que los datos fisiológicos, como comprobación de la intensidad de la prueba. De todos modos, a causa de la fatiga, para los atletas era muy difícil distinguir el porcentaje de dificultad para atribuirlo, respectivamente, a los parámetros cardiacos, ventiladores y musculares, como en el experimento de Shephard (Shephard y otros, 1992). Se puede, sin embargo, defender que el uso de la escala de percepción del esfuerzo en el ejercicio de duración, a este nivel de intensidad (VMA y VO₂ max), para el control de la intensidad de entrenamiento, no tiene la misma validez de la identificación de la velocidad y de su expresión como fracción de la VMA.

Correlaciones entre el Tlim a la VMA y otros parámetros bioenergéticos: entre el Tlim a la VMA y la velocidad en los 3.000 m (y3000) y en los 20 km (y20)

Como se ha dicho anteriormente, el valor del Tlim a la VMA no está relacionado a otros parámetros del rendimiento de la carrera de larga distancia, como el VO₂ max, la velocidad máxima aeróbica, la economía de carrera y el índice de resistencia. El valor medio de este último, calculado en esta población de sujetos, era de -6,42 (± 1,69), valor que corresponde a la capacidad de emplear una fracción notable del VO₂ max (83,7 % ± 5) en los 20 km de carrera, o sea 68 min a la velocidad de casi 17,5 km·h⁻¹ (± 0,9). Los valores calculados por Péronnet y otros (1987) partiendo de los records mundiales masculinos, que sin embargo, no han sido obtenidos siempre por el mismo atleta, aunque sí sobre una distancia

igual, eran similares a $-5,05 \% VO_2 \max \cdot \ln t-1$ No fue hallada ninguna correlación entre el Tlim a la VMA y el índice de resistencia personal. Esto es sorprendente en cuanto, como habíamos observado, el Tlim está incluido en la ecuación (1) utilizada para calcular el mismo índice. Además, la utilización del Tlim personal a VMA, respecto a la de los 7 minutos estándar, paradójicamente penaliza a los sujetos cuyo Tlim a la VMA y $VO_2 \max$ es largo. De hecho, para estos sujetos, el índice de resistencia resulta muy bajo, indicando una menor capacidad de mantener un elevado porcentaje de $VO_2 \max$ en largas duraciones de carrera (<7 min). Por eso, para poder confrontar el índice de resistencia de los sujetos en el cálculo del mismo índice, debe ser tomado en consideración sólo el Tlim personal a la VMA. Aunque esto no esté relacionado con el índice de resistencia, sin embargo, está relacionado con el umbral anaeróbico expresado en porcentaje del $VO_2 \max$ otro criterio de valoración de la resistencia, o sea, la capacidad de mantener una fracción notable del $VO_2 \max$.

En conclusión, el Tlim a la VMA es un parámetro suplementario de la capacidad aeróbica de un corredor, e indica, de manera precisa, su gasto energético a la potencia (o a la velocidad) máxima aeróbica. Se puede, por consiguiente, aconsejar referirse a la velocidad máxima aeróbica, así como también al tiempo máximo por el cual, tal velocidad puede ser mantenida. El Tiempo límite a la VMA se ha revelado como un dato reproducible e independiente de los demás parámetros de la capacidad aeróbica. Para calcular la duración y la intensidad de los entrenamientos (tipo interval training), estas dos características pueden ser complementarias. Además, este protocolo de trabajo del Tlim a la VMA puede representar un modelo del estímulo representado del ejercicio, no sólo para los humanos, sino también para los animales, permitiendo estudiar y profundizar las nociones del $VO_2 \max$ ahora ya pasadas de moda, pero aún oscuras, en lo que se refieren a su significado y a las razones de sus limitaciones.

Desde el punto de vista práctico, el Tlim a la VMA es un dato complementario y reproducible que puede ser útil para seguir y valorar al atleta especializado en las disciplinas que requieren un esfuerzo de media y larga duración, de las que, sin embargo, se debe aún experimentar la sensibilidad respecto del entrenamiento y del proceso de maduración y de envejecimiento.

REFERENCIAS

1. Åstrand, P.O.; Ryhming, I. (1954). A normogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness from pulse rate during submaximal work. *J Appl Physiol.* 7, 218-222.
2. Aunola, S.; Rusko, H. (1984). Reproducibility of aerob. 53, 260-266.
3. Aunola, S.; Alanen, E.; Marniemi J.; Rusko, H. (1990). The relation between cycling time to exhaustion to anaerobic threshold. *Ergonomics*, 33, 1027-1042.
4. Billat, V; Hautier, C.; Blanchi, J.P.; Pinoteau, J.; Koralsztein, J.P. (1991). Evolution des parametres cinématiques et bioenergetiques de la course au cours d'une epreuve de temps limite a vitesse maximale aérobic. *Innovation and technology in biology and medicine*, 12, 89-97.
5. Borg, G.; Hassmen, P.; Lagerstrom, M. (1987). Perceived exertion related to heart rate and blood lactate during arm and leg exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 56, 679-685.
6. Camus, G.; Juchnes, J.; Thys, H.; Fossion. A. (1988). Relation entre le temps limite et la consommation maximale d'oxygene dans la course supramaximale. *J. Physiol, Paris*, 83, 26-31.
7. Costill, D.L. (1976). The relation between selected physiological variables and distance running performance. *J. Sports Med. Fitness*, 7, 61-66.
8. di Prampero, P.E.; Atchou, O.; Bruckner, J.C; Moi. C. (1986). The energetics of endurance running. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 55, 259-266.
9. Fairbairn, M.S.; Coutts K.C.; Pardy R.L.; McKenzie D.C. (1991). Improved respiratory muscle endurance of highly trained cyclists and the effects on maximal exercise performance. *Int. J. Sports. Med.*, 12: 66-70.
10. Gleser, M. A., Vogel J. A. (1973). Endurance capacity for prolonged exercise on the bicycle ergometer. *J. Appl. Physiol.*, 34, 438-442.
11. Hermanssen, L.; Vaage, O. (1977). Lactate disappearance and glycogen synthesis in human muscle after maximal exercise. *Am. J. Physiol.*, 233, 151-154.
12. Hill, A.V. (1927). Muscular movement in man. *New York, Mc Graw - Hill*, .
13. Housh, D.J.; Housh, T.J.; Bauge, S.M. (1989). The accuracy of critical power test for predicting time to exhaustion during cycle ergometry. *Ergonomics*, 32, 997-1004.
14. Kyle, S.B.; Smoak, B.L.; Douglas, L.W.; Deuster, P.A. (1989). Variability of responses across training levels to maximal treadmill exercise. *J. Appl. Physiol.*, 67, 160- 165.
15. Lacour, J.R.; Flandrois, R. (1977). Le role du metabolisme aerobc dans l'exercice intense de longue durée. *J. Physiol.*, 89-130, Paris.
16. Lacour, J.R., Padilla-Magunacelaya, S.; Chatard J.C.; Arsac, L.; Barthelemy, J.C. (1991). Assessment of running velocity at maximal oxygen uptake. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 62, 77-82.
17. McLellan, T.M.; Cheung, S.Y. (1992). comparative evaluation of the individual anaerobic threshold and the critical power. *Med.*

- Sci. Sports Exerc.*, 24, 543-550.
18. Medbø, J.I.; Tabata, I. (1989). Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.*, 67, 1881-1886.
 19. Monod, H.; Scherrer J. (1965). The work capacity of synergy muscular groups. *Ergonomics*, 8, 329-338.
 20. Moritani, T.; Nagata, A.; De Vries, H.A.; Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical working capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24, 339-350.
 21. Padilla, S.; Bourdin, M.; Barthelemy, J. C., Lacour J. R. (1992). Physiological correlates of middle-distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 65, 561-566.
 22. Pepper, M.L; Housh, T.J.; Johnson, G.O. (1992). The accuracy of the critical velocity test for predicting time to exhaustion during treadmill running. *Int. J. Sports Med.* 13, 2, 121-124.
 23. Péronnet, F.; Thibault, G.; Rhodes, E.C.; McKenzie, D.C. (1987). Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc. Physiol*, 19, 610-615.
 24. Poole, D.C.; Ward, S.A.; Gardner, O.W.; Whipp, B.J. (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics*, 31, 1265-1279.
 25. Powers, S.K.; Martin, D.; Cicale, M.; Collomp, N.; Huang D.; Criswell, D. (1992). Exercise-induced hypoxemia in athletes: role of inadequate hyperventilation. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 65, 37-42.
 26. Ramsbottom, R.; Williams, C.; Kerwin, D.O.; Nute, M.L.O. (1992). Physiological and metabolic responses of men and women to 5-km treadmill time trial. *Journal of Sports Sciences*, 10, 119-129.
 27. Sahlin, K.; Ren, J.M.; Broberg, S. (1988). Oxygen deficit at the onset of submaximal exercise is not due to a delayed oxygen transport. *Acta Physiol. Scand*, 134, 175-180.
 28. Saltin, B.; Strange, S. (1992). Maximal oxygen uptake: "old" and "new" arguments for a cardiovascular limitation. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24, 30-37.
 29. Schwarz, D. (1969). Méthodes statistiques à l'usage des medecins et des biologistes. Paris, Flammarion, 3^e Ed., 150-156.
 30. Shephard, R.J.; Vandewalle, H.; Bouhlef, G.E.; Monod, H. (1992). Respiratory, muscular, and overall perceptions of effort: the influence of hypoxia and muscle mass. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24, 556-567.