

# Cuantificación de la capacidad de esfuerzo y evaluación de la capacidad física en el hombre

DR. PER-OLOF ASTRAND.

El promedio del metabolismo basal en el hombre es bastante alto; de 5.500 - 7.000 kJ (\*), durante un período de 24 horas es una cifra necesaria para un adulto, lo que equivale a la energía extra requerida para andar 18 millas (30 km.). El único factor que puede aumentar

significativamente el consumo de energía por encima del nivel de reposo es la actividad muscular. El trabajo de los músculos del esqueleto puede aumentar el promedio del proceso oxidativo hasta más de 50 veces de su nivel de reposo.

## GASTOS DE ENERGIA SEGUN ACTIVIDAD

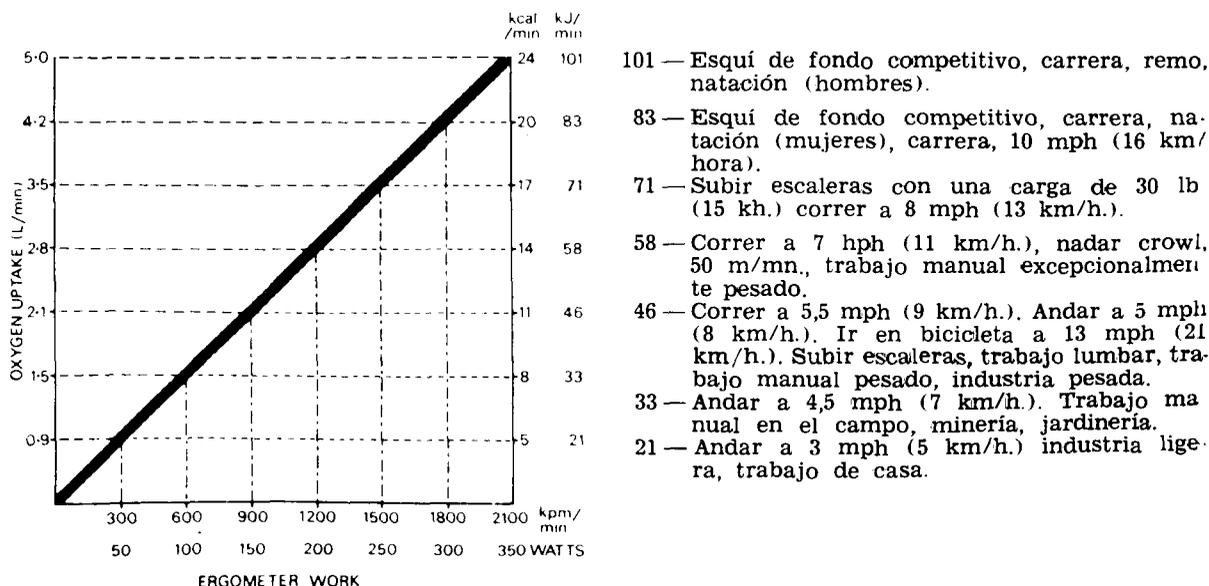


Fig. 1. — Trabajo en la bicicleta ergométrica y actividad física equivalente.

(\*) 1 kJ (kilojulio) = 1000 J (julio); 1 kcal = 4.2 kJ.  
Manuscrito remitido para su publicación: Marzo 1975.  
Del Dpto. de Fisiología, Gymnastik-och Idrottshögskolan, Stockholm, Sweden.

Progress in Cardiovascular Diseases, Vol. XIX, N.º 1 (July/August), 1976.

La figura 1 muestra ejemplos de algunas actividades y su demanda energética expresada en kJ (y Kcal) así como la correspondiente necesidad de transporte de oxígeno a las mitocondrias. De un consumo de oxígeno ( $\text{VO}_2$ ) de 0.20-0.30 litros/minuto para un sujeto en reposo, tendido, muchas actividades cotidianas, incluyendo andar, llevar, levantar, etc., harán aumentar el consumo de oxígeno hasta alrededor de 1 litro/min., un trabajo manual pesado hasta 1.5 ó incluso 2 litros/min. En deportes de competición hemos medido consumos de oxígeno por encima de los 6 litros/min. (¡el «récord del mundo» está por el momento en 7,4 litros/min.!).

Una consecuencia de la habilidad única del músculo del esqueleto de variar su promedio metabólico, es que esta actividad puede interferir seriamente con el «medio interno», es decir, cambiar la composición y propiedad del fluido en las células y sus alrededores. Mientras el consumo de energía y oxígeno aumenta hasta 50 veces, el promedio de producción de calor, anhídrido carbónico, agua y productos de eliminación debe aumentar de igual modo. Para mantener el equilibrio físico y químico de las células debe producirse un aumento concomitante en el intercambio de moléculas e iones entre el fluido intra y extra celular; fluido «fresco» debe regar continuamente las células activas. El mantenimiento de un medio ambiente relativamente estable dentro del cuerpo durante el ejercicio representa un importante esfuerzo para varias «funciones de servicio», que no es menor para la respiración y la circulación. El sistema circulatorio está normalmente preparado para proporcionar un servicio óptimo, no sólo en condiciones de reposo sino también en conexión con una actividad física vigorosa. Debe resaltarse también que el funcionamiento óptimo sólo puede obtenerse sometiendo regularmente al corazón, circulación, músculos, esqueleto y sistema nervioso a una cierta carga, es decir, entrenando.

Las pruebas funcionales han conseguido una amplia aplicación en la práctica médica y han demostrado ser de gran valor diagnóstico. La base para todas estas pruebas funcionales se halla en el supuesto de que una anomalía orgánica o una inadecuación funcional es más fácil que se muestre cuando el órgano o la función orgánica son sometidos a «stress» funcional que en situación de reposo cuando la demanda es mínima.

## PRODUCCION DE ENERGIA

En reposo y durante una actividad muscular de intensidad relativamente moderada, la

energía necesaria es producida por «procesos aeróbicos», es decir, una oxidación en las mitocondrias de ácidos grasos libres, hidratos de carbono y proteínas. Por cada litro de oxígeno consumido se producen unos 20 kJ (la cantidad exacta depende del combustible, pero la variación es pequeña, entre 19.7 y 21.2 kJ). Por supuesto la energía es utilizada para la resíntesis de ATP a partir del ADP y del P. Durante la transición de reposo a ejercicio vigoroso el aporte de oxígeno a los músculos que trabajan se ve eventualmente retrasado, y en ejercicio muy fuerte se pasará a un déficit de oxígeno continuo. En tales condiciones parte de la energía se derivará de «procesos anaeróbicos»: el ATP y la fosfocreatina pueden producir entre 20-30 kJ, y la descomposición del glucógeno en ácido pirúvico y ácido láctico puede contribuir con unos 100 kJ adicionales (como máximo). Esta reserva anaeróbica puede cubrir la demanda de energía sólo durante algunos minutos de ejercicio vigoroso. Si dejamos aparte las actividades de deporte de competición y algunas situaciones poco frecuentes (más bien de tipo emergencia) los procesos anaeróbicos desempeñan en realidad un papel poco importante en nuestra vida diaria, por lo menos desde un punto de vista cuantitativo. Si a ello añadimos que por el momento no es posible una exacta medida del poder de la maquinaria anaeróbica (excepto para unas pocas condiciones bien estandarizadas), tenemos una buena excusa para excluir la producción de energía anaeróbica como tema principal de esta discusión sobre la capacidad de trabajo físico.

La habilidad de un sujeto para realizar trabajo muscular durante minutos o durante periodos de tiempo más largos, debe depender necesariamente de su capacidad para transportar oxígeno desde el aire hasta las mitocondrias: el oxígeno es la llave de las grandes reservas de energía. Cuanto mayor es el consumo máximo de oxígeno ( $\text{VO}_2$  máx.: máximo poder aeróbico), mayor es la cantidad de energía producida. Este es el motivo que está detrás de la determinación del  $\text{VO}_2$  máx. La figura 2 da un ejemplo del procedimiento. En una bicicleta ergométrica el sujeto trabajaba durante cinco minutos a diversas intensidades de trabajo externo, medidas en wattios. En este tipo de trabajo (como en el correr) hay un incremento lineal del consumo de oxígeno con creciente intensidad de trabajo (fig. 2 B). Sin embargo, para este sujeto en particular, exponerse a un trabajo de intensidad superior a 250 w. no aumentará más el consumo de oxígeno; alcanza una plataforma (se estabiliza) a los 3.5 litros/min. Esta «nivelación» es el criterio ob-

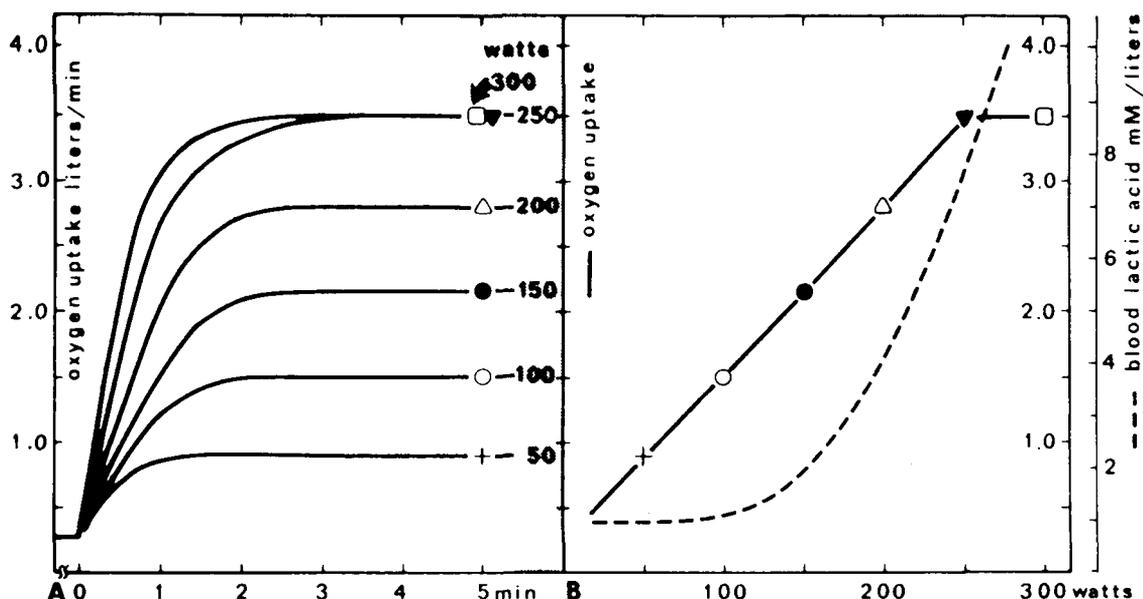


Fig. 2.— A) Demostración esquemática del incremento en consumo de  $O_2$  durante el ejercicio en la bicicleta ergométrica, con diferentes cargas de trabajo (anotado en el área sombreada) realizado durante 5 ó 6 minutos. B) consumo de  $O_2$  en el experimento antes mencionado, medido después de 5 minutos y representado en relación con la carga de trabajo. Nótese que 250 wattios (1.500 kpm/min.) elevó el consumo de  $O_2$  del sujeto al máximo y que 300 wattios no aumentó más el consumo de  $O_2$ ; la carga de trabajo aumentada fue posible gracias a los procesos anaeróbicos. El máximo poder aeróbico igual a 3,5 l/m. (Para simplificar la carga de trabajo que es suficiente para llevar a su máximo al consumo de oxígeno del sujeto, en este caso 250 w. puede anotar  $VO_2$  máx.). También se ha incluido el punto de máxima concentración de ácido láctico en sangre en cada experimento.

jetivo de que el sujeto ha alcanzado su máximo poder aeróbico en este tipo de trabajo. Si no estuviese bien motivado podía haber parado a una carga de trabajo de 200 w. Otro signo de la limitación para proveer suficiente oxígeno al tejido es la acumulación del lactato en el músculo que trabaja y en la sangre. Es un dato empírico que con una concentración de lactato en la sangre igual o superior a 8 mM, el consumo de oxígeno está en o muy cerca de la meseta límite (línea discontinua en la figura 2).

En muchas actividades la energía producida, al comparar diferentes sujetos, es relativamente similar para una tarea dada. Esto es válido también para el trabajo en un cicloergómetro. (SD = 6 % para una intensidad submaximal de trabajo dada). Al andar o correr en una cinta sin fin el peso del cuerpo será decisivo para el costo energético a una velocidad e inclinación dadas. Al calcular el costo de oxígeno por kilo de peso corporal, pueden deducirse las variaciones individuales en el consumo de energía para una carga determinada. Debería resaltarse que implica una considerable diferencia en el costo energético por kilo de peso el hecho de que uno ande o corra (jogging). La figura 3 muestra los

datos de un sujeto andando y corriendo a varias velocidades. Además, un cambio en la frecuencia de paso (zancada) a una velocidad dada de carrera modificará también el coste energético. La predicción de la demanda energética a una velocidad dada en marcha o carrera se complica en pruebas al aire libre por factores como la velocidad del viento y el tipo de superficie de la pista. Según PUGH el consumo de oxígeno durante la marcha a 4.5 km/h. sin resistencia del viento era de 0.77 litros/min. para un sujeto. Con viento en contra el consumo de oxígeno aumentaba a 2.1 litros/min. a una velocidad del viento de 16.5 m/seg.

El consumo de oxígeno en un grupo que nadaban a una velocidad de 0.6 m/seg. iba desde 1.3 a 2.6 litros/min. (la técnica iba de excelente a «normal», siendo el estilo braza). Diferentes estilos aumentarán más las variaciones individuales en eficacia ( $VO_2$  de 1.3 - 3.1 litros/min.).

Estos ejemplos se presentan para ilustrar la dificultad en evaluar las demandas de energía y por tanto la carga en el sistema de transporte de oxígeno para actividades simples y aparentemente bien definidas. Las variaciones tanto inter como intra individuos en la efica-

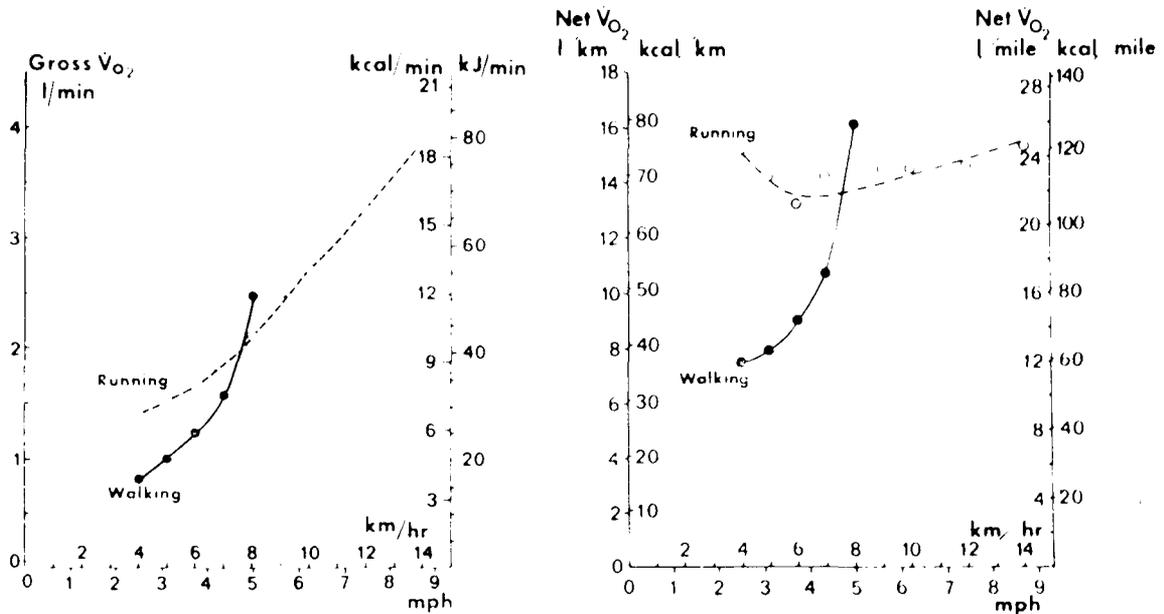


Fig. 3. — El consumo de oxígeno y el gasto energético calculado para un hombre de 75 kg. de peso al andar (círculos negros) y al correr (círculos blancos) a varias velocidades. En el cuadro de la izquierda se da el consumo de oxígeno total; en el de la derecha el consumo de oxígeno en reposo (sentado) se restó del total para obtener la energía neta producida (el coste extra para el movimiento).

cia aumentan en movimientos corporales más complicados. Con tales perspectivas parece inútil presentar tablas de demandas energéticas (a menudo en la literatura incluso con decimales!) de andar a una velocidad dada, ducharse, calistenia, bailar, hacer camas, talar árboles, etc. Los datos de la figura 1 debería considerarse guías generales y aproximativas, pero nada más.

### RENDIMIENTO FISICO Y APTITUD

Podemos resumir resaltando que «performance» es un concepto muy complejo. En un sentido amplio deberían considerarse los siguientes factores: 1.º Consumo de energía - energía aeróbica producida y energía anaeróbica producida. 2.º Función neuromuscular - fuerza y técnica. 3.º Factores psicológicos - motivación y tácticas.

De algún modo cada ejercicio y situación de trabajo es única por tener un esquema específico en sus demandas en los factores mencionados (y otros). Resulta muy difícil o imposible predecir el rendimiento en una actividad a partir de los datos obtenidos en el estudio de otra actividad. Sin embargo, hay un factor operativo en todos los tipos de movimiento muscular; es decir, un aumento en la demanda de energía,

y (sin tener en cuenta la contribución anaeróbica) esto se refleja en una elevación del consumo de oxígeno. Por eso, conociendo el potencial del sistema de transporte de oxígeno de un individuo se puede, de hecho, predecir su potencial para un ejercicio muscular vigoroso. Por otro lado, un poder aeróbico máximo alto no garantiza un buen rendimiento en una prueba específica, para la que la técnica, la fuerza y la motivación, etc., pueden ser escasas.

Para un rendimiento de alto nivel en esquí de fondo en competiciones internacionales el consumo máximo de oxígeno de los participantes debería estar alrededor de los 80 ml/kg/min. o más. Hay algunos deportistas con un poder aeróbico tan alto pero que mostraron un rendimiento deficiente esquiando. Puede ser que les falte la habilidad y el entrenamiento específico aunque pueden ser corredores extraordinarios.

### ¿CUALES SON LOS FACTORES LIMITANTES DEL TRANSPORTE DE OXIGENO DURANTE EL EJERCICIO?

Hay muchos estudios que muestran que la función pulmonar no limita el consumo de oxígeno en sujetos normales. Durante el ejercicio máximo hay una hiperventilación debida a una

tendencia respiratoria extraordinaria causada por el descenso del pH sanguíneo. La tensión de oxígeno alveolar aumenta y el  $PCO_2$  se reduce. Puede existir una débil reducción en el  $PO_2$  arterial, pero ello no se debe necesariamente a una limitación en la difusión de oxígeno a través de las membranas alveolar y eritrocítica. Debe destacarse también que uno puede voluntariamente aumentar más la ventilación pulmonar durante el esfuerzo máximo, indicando que los músculos respiratorios no son sometidos normalmente a su máxima capacidad.

Al discutir sobre la relación existente entre los capilares de los pulmones y los de los músculos activos, es aconsejable considerar la fórmula de FICK para el transporte de  $O_2$ :

$$VO_2 = \frac{HR \times SV \times (CaO_2 - CvO_2)}{Q}$$

(HR = Frecuencia cardíaca; SV = Volumen sistólico; Q = débito cardíaco; C = contenido). El incremento de la demanda de oxígeno durante el ejercicio es satisfecho por un aumento de la deuda cardíaca, así como por una diferencia arterio-venosa de contenido en  $O_2$  ( $CaO_2 - CvO_2$ ) gradualmente mayor.

La figura 4 presenta las curvas principales para las funciones mencionadas en sujetos bien entrenados trabajando en un cicloergómetro a intensidades de trabajo submaximales y maximales. La producción cardíaca se midió con una técnica de colorante diluido. El incremento de producción cardíaca era casi curvi-lineal con el aumento de consumo de oxígeno. Los estudios han demostrado que la producción cardíaca para un consumo de oxígeno dado es esencialmente idéntica para sujetos entrenados y no entrenados en ejercicios de brazos y piernas, respectivamente, corriendo y yendo en bicicleta, y durante carrera y natación. Hay variaciones individuales en los valores absolutos, pero podemos concluir que el consumo de oxígeno permite una evaluación indirecta del débito cardíaco. Durante el ejercicio máximo hay una relación lineal entre consumo máximo de oxígeno y débito cardíaco máximo. Sujetos con un consumo de oxígeno máximo de 3.0 litros/min. alcanzarán un débito cardíaco de unos 20 litros/min.; con una  $VO_2$  máx. de 6.0 litros/min., el Q máx. será de unos 40 litros/min.

Durante el ejercicio el plasma se extravasa y la hemoconcentración resultante, origina un ligero aumento en la concentración de oxígeno en la sangre arterial. Durante el esfuerzo máximo la sangre que sale de los músculos tiene una cantidad de oxígeno muy baja y la sangre venosa rica en  $CO_2$ , será de unos 20 ml/litro de sangre.

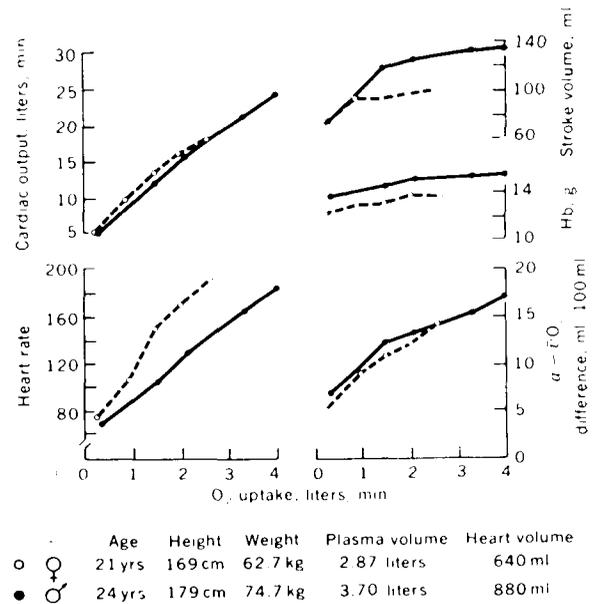


Fig. 4. — La figura se basa en los valores medios de datos de 11 mujeres y 12 hombres, todos ellos relativamente bien entrenados y trabajando en una bicicleta ergométrica en posición sedante. (Dado que la abscisa proporciona los datos del consumo de oxígeno en valores absolutos, las curvas medias calculadas pueden inducir a error. Los sujetos menos aptos tienen valores bajos tanto en consumo de oxígeno máximo como en volumen sistólico. Los que tienen una buena capacidad de consumo de oxígeno tienen también un volumen sistólico grande. Un hombre con un poder aeróbico máximo de 5 litros/min. a la larga alcanza su volumen sistólico máximo en principio con una carga de trabajo que da un consumo de oxígeno de 2 litros/min. El que tiene un consumo máximo de oxígeno de 3,5 litros/min. alcanza su plataforma para el volumen sistólico cuando el consumo de oxígeno sobrepasa 1,3 litros/min.).

En ejercicio vertical (erguido) el volumen sistólico aumentará en un 50 % por encima del valor de «reposo» pero se alcanza un máximo a un consumo de oxígeno que corresponde a más o menos el 40 % del  $VO_2$  máximo del sujeto. Por ello, el principal factor tras el aumento de la producción cardíaca durante el ejercicio es un incremento de la frecuencia cardíaca. El aumento de la frecuencia cardíaca es esencialmente lineal con el consumo de oxígeno, por lo menos dentro unos amplios límites de cargas de trabajo submaximales. Sin embargo, al trabajar con grupos musculares menores (p. e. ejercicios de brazos) y ejercicios isométricos (estáticos) la frecuencia cardíaca para un consumo de oxígeno dado es significativamente mayor que en ejercicios dinámicos de piernas.

Hay una tendencia a alcanzar una frecuen-

cia cardíaca mayor a un consumo de oxígeno dado (y débito cardíaco) durante la carrera que durante el ciclismo, pero esta diferencia no tiene consecuencias prácticas, ya que las variaciones individuales en la respuesta de ritmo cardíaco a los dos tipos de ejercicio son bastante marcadas.

A pesar de la resistencia periférica reducida en el estrato vascular durante el ejercicio dinámico, hay una elevación de la presión sanguínea intra-arterial durante el ejercicio en sujetos jóvenes, sanos. La presión sistólica aórtica alcanzará unos 175 mm. Hg. pero el incremento en la presión diastólica es generalmente menos de 10 mm. Hg. En individuos mayores normotensivos la presión sistólica puede subir hasta unos 225 mm. Hg. El ejercicio de brazos y el trabajo estático elevarán la presión sanguínea más que el ejercicio dinámico.

Para una comprensión de los conceptos que van a desarrollarse en este resumen se requiere un conocimiento práctico de las variables inherentes a la fórmula de FLICK. Por ello se ofrece este breve resumen de algunos conceptos específicos.

#### CONTENIDO DE OXIGENO EN LA SANGRE ARTERIAL

Una hipoxia aguda (altura de 4.000 m.) reducirá el contenido de oxígeno de la sangre arterial. Durante el trabajo submaximal hay un aumento compensatorio de la producción cardíaca (debida a una frecuencia cardíaca elevada), pero durante esfuerzos máximos la producción cardíaca no difiere de los valores de control. No hay un mecanismo que permita una utilización más eficaz del oxígeno en sangre, y por eso el consumo máximo de oxígeno y el rendimiento físico se verán reducidos.

Con parte de la hemoglobina bloqueada por el monóxido de carbono (hasta un 20 %) el transporte de oxígeno a una intensidad submaximal de trabajo dada puede ser mantenido. La frecuencia cardíaca es aumentada y el débito cardíaco está a niveles de control o algo más alto. Durante el trabajo máximo el consumo de oxígeno se reduce más o menos en proporción a la variación del contenido de oxígeno en la sangre arterial. Sin embargo, con 15 % HbCO la producción cardíaca se mantuvo un 5 % más baja en los experimentos de control.

Un aumento en la tensión de oxígeno en el aire inspirado aumentará el consumo de oxígeno y mejorará el rendimiento. Estudios recientes de EKBLÖM y otros en nueve sujetos respirando un 50 % de oxígeno en nitrógeno al nivel del mar mostraron un incremento me-

dio del 12 % en el poder aeróbico máximo. El débito cardíaco sólo aumentó ligeramente, pero la diferencia a-v de oxígeno aumentó considerablemente.

Con pérdidas de sangre controladas y reinfusión de glóbulos rojos puede estudiarse el efecto de agudas variaciones del hematocrito. El efecto de la pérdida de sangre es un deterioro de un rendimiento, que está relacionado con un consumo de oxígeno máximo reducido. Una reinfusión de glóbulos rojos (equivalente a 800 ml. de sangre) en sujetos que se han recuperado de la pérdida de sangre podría mejorar dramáticamente («de la noche a la mañana») el consumo de oxígeno máximo y el rendimiento hasta valores supernormales (un aumento promedio en la  $VO_2$  máx de 9 %). En cinco sujetos corriendo a la máxima velocidad que podía ser mantenida durante unos cinco minutos el contenido de oxígeno de la sangre arterial fue un promedio de un 13 % más alto después de la reinfusión de glóbulos rojos comparado con la situación después de la pérdida de sangre. La diferencia en el consumo máximo de oxígeno fue de aproximadamente 13 % (pero las variaciones individuales eran bastante grandes). La frecuencia cardíaca máxima y el volumen sistólico respectivamente eran más o menos idénticos en los distintos experimentos.

#### VOLUMEN DE EYECCION SISTOLICO

La frecuencia cardíaca durante el esfuerzo maximal y submaximal puede ser modificada de forma notoria por varias drogas. La figura 5

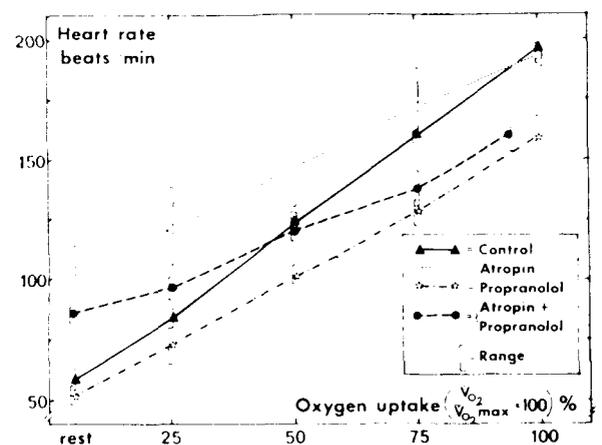


Fig. 5. — La relación entre frecuencia cardíaca (medias y desviaciones) y consumo de oxígeno relativo  $\frac{VO_2}{VO_{2max}} \times 100$  en cinco series de experimentos (cuatro sujetos) durante condiciones normales (control) y después de bloqueo. La frecuencia cardíaca de reposo se registró en posición sentada.

El efecto de la pérdida de sangre es un deterioro de un rendimiento, que está relacionado con un consumo de oxígeno máximo reducido. Una reinfusión de glóbulos rojos (equivalente a 800 ml. de sangre) en sujetos que se han recuperado de la pérdida de sangre podría mejorar dramáticamente («de la noche a la mañana») el consumo de oxígeno máximo y el rendimiento hasta valores supernormales (un aumento promedio en la  $VO_2$  máx de 9 %).

presenta los datos en sujetos sometidos a esfuerzo submaximal (en un cicloergómetro) y maximal (en la cinta sin fin) cuatro veces: 1.º Control. 2.º Tras la infusión de 10 mg. de propanolol. 3.º Tras la infusión de 2 mg. de atropina. y 4.º Tras un doble bloqueo (propanolol y atropina). Para un consumo de oxígeno dado la frecuencia cardíaca variaba unas 40 pulsaciones por minuto, tomando los extremos, pero el débito cardíaco era casi similar en las cuatro situaciones ya que el volumen sistólico compensaba los cambios en la frecuencia cardíaca. (En los experimentos con propanolol hay una reducción promedio de 1.5 - 2 litros/min. de débito cardíaco). Debe destacarse que los sujetos alcanzaron su consumo máximo de oxígeno normal a pesar de la reducción de frecuencia cardíaca máxima de 195 a 160 pulsaciones/minuto. El tiempo de «performance» fue significativamente más corto después del Beta-bloqueo y la presión sanguínea intra-arterial se redujo.

Hay grandes diferencias individuales en el volumen sistólico durante el ejercicio. Los valores oscilan entre los extremos de 40 hasta unos 200 ml. Hay una variación casi proporcional entre débito cardíaco máximo (de 8 a 40 litros/min.) y consumo de oxígeno máximo (desde 1 hasta 6 litros/min.). Los factores genéticos y la actividad física habitual del sujeto afectan al volumen sistólico. Estudios longitudinales han mostrado que la preparación física aumenta el volumen sistólico, mientras que la inactividad prolongada, por ejemplo, el reposo en cama, lo reduce. En un estudio muy bien controlado la  $VO_2$  máx. disminuye en un 28 % (valor medio) en 5 sujetos mantenidos en la cama durante tres semanas (tres de ellos ya eran previamente sujetos muy sedentarios, y dos bien entrenados). Este descenso se debió totalmente a una disminución del volumen sistólico.

Durante dos meses de entrenamiento físico diario el consumo máximo de oxígeno para tres de los sujetos sedentarios aumentó un 33 % por encima del test control realizado antes del reposo en cama y se debía casi por igual a un volumen sistólico aumentado y a una diferencia a  $\cdot vO_2$ . (Su mejoría en  $VO_2$  máx. en el test realizado después del reposo en cama fue de casi un 100 %). Un incremento del 15 - 20 % en  $VO_2$  máx. es un hallazgo frecuente en los estudios de entrenamiento.

Cuanto más bajo es el  $VO_2$  máx. inicial mayor será el incremento debido a la preparación física. En muchos estudios el incremento en  $VO_2$  máx. se debía por completo a un incremento en el volumen sistólico, especialmente en sujetos mayores, en otros hasta un 50 % del

incremento de la  $VO_2$  máx. con el entrenamiento era debido a la diferencia a  $\cdot vO_2$ , aunque manteniendo el incremento de volumen sistólico.

La frecuencia cardíaca máxima no se modifica o se reduce escasamente (menos de 10 pulsaciones por minuto) durante un período de reposo en la cama o de preparación física, respectivamente. Sin embargo, con la edad se produce una reducción de la frecuencia cardíaca en casi todos los sujetos.

## LA MASA MUSCULAR EN ACTIVIDAD

Tarabajando a una intensidad máxima con una pierna en el cicloergómetro, se obtuvo en un estudio un consumo de oxígeno de 2.4 litros por minuto. Trabajando con dos piernas el máximo fue de 3.5 litros/min. tan sólo, es decir, un incremento relativamente pequeño.

Nadando sólo con los brazos y con las piernas atadas juntas, una nadadora bien entrenada consiguió un consumo de oxígeno de 2.7 litros/min., y nadando con patada (sólo pies) (con los brazos en una tabla de corcho) 3.4 litros/min. En el estilo completo no alcanzaba la cifra de 2.7 + 3.4 sino «sólo» 3.6 litros/min. Trabajando con brazos y piernas simultáneamente en dos cicloergómetros aumentaba la  $VO_2$  máx. en menos de 10 % comparado con el esfuerzo máximo de piernas (ver a continuación).

El propósito de este breve resumen es ilustrar el hecho de que el consumo de oxígeno máximo (máximo poder aeróbico) en ejercicios en que intervienen grandes grupos musculares aparentemente no está limitado por la capacidad de las mitocondrias musculares para consumir oxígeno. Pequeñas variaciones en el volumen de oxígeno transportado al tejido ( $Qx CaO_2$ ) producirán cambios casi proporcionales en el oxígeno consumido. Ejercicio con los brazos (en natación) así como con una pierna incluye grupos musculares que también intervienen en el trabajo con dos piernas. Hay que destacar sin embargo, que el trabajo combinado no aumenta de forma notoria la  $VO_2$  máx. Estos hallazgos sustentan la hipótesis de que la circulación central es el factor limitante.

Hay que resaltar que el período de preparación física aumentará el volumen de las mitocondrias en los músculos entrenados, incrementando la capacidad de energía aeróbica. GOLLNICK y col. han concluido de sus estudios del sistema enzimático en músculos del esqueleto de hombres entrenados y no entrenados, que la capacidad metabólica de ambos músculos, preparados y no preparados normalmente ex-

cedía el actual consumo de oxígeno de los músculos. El incremento de enzimas observado con el entrenamiento también supera con mucho al incremento de la  $\text{VO}_2$  máx.

En ejercicio fuerte prolongado (por ejemplo horas) el factor limitante podría ser un descenso de los depósitos (reservas) de glucógeno en los músculos activos y en el hígado. Con el entrenamiento, la energía producida por los ácidos grasos libres será proporcionalmente mayor, se requerirá más tiempo para agotar una cantidad dada de las reservas de glucógeno y el rendimiento mejorará. Este cambio en el esquema metabólico puede ser una consecuencia de los cambios inducidos en el sistema enzimático por el entrenamiento físico.

La conclusión es que «es el sistema cardiovascular quien pone el límite superior en el consumo de oxígeno». Por el momento se desconoce si es el débito cardíaco (circulación central) o la perfusión periférica el factor crítico limitante de la  $\text{VO}_2$  máx. (para más discusión ver ROWELL que incluye un análisis de la regulación de la presión sanguínea durante el ejercicio).

Hay sin embargo, algunos hallazgos sorprendentes que no encajan en este esquema general. Un campeón de natación alcanzó durante varios años la misma  $\text{VO}_2$  máx., al correr sobre la cinta sin fin (tapiz roulant), pero su rendimiento máximo al nadar variaba según la intensidad de su entrenamiento de natación, y lo mismo sucedía con su marca en natación. Dos gemelas idénticas alcanzaban una  $\text{VO}_2$  similar al correr (3.6 l/min.), pero la muchacha que había sido entrenada en natación conseguía un consumo de oxígeno superior en un 30 % (3.6 l/min.) al de su hermana no entrenada en natación (que algunos años antes fue una nadadora de tanto éxito como su hermana). Evidentemente hay una especificidad en el efecto del entrenamiento.

#### EVALUACION DE LA CAPACIDAD FISICA

Las conclusiones del resumen que antecede son las siguientes: 1.º Toda actividad muscular requiere energía extra, y por consiguiente el ejercicio impondrá una carga extra en el sistema de transporte de oxígeno en el cuerpo. 2.º El consumo de oxígeno a una intensidad submaximal dada de trabajo en un cicloergómetro o en una cinta sin fin es muy constante incluso si el trabajo se realiza bajo distintas condiciones (por ejemplo sujetos condicionados o incondicionados, expuestos a hipoxia o hiperoxia, medio ambiente caliente, deshidratado).

3.º El débito cardíaco está altamente correlacionado con el consumo de oxígeno. 4.º La  $\text{VO}_2$  máxima de un individuo se modifica altamente en proporción al volumen de oxígeno ofrecido al tejido. Es de particular importancia en este contexto la cantidad del volumen sistólico. 5.º Si a causa de un cambio en la actividad física habitual se produce un aumento del volumen sistólico, hay un descenso concomitante de la frecuencia cardíaca a una intensidad submaximal de trabajo; un descenso del  $\text{VO}_2$  máx. va casi siempre acompañado de un incremento de la frecuencia cardíaca submaximal. Hablando en general, un individuo con un  $\text{VO}_2$  máx. alto, se caracteriza por un gran volumen sistólico y una frecuencia cardíaca relativamente baja para un consumo maximal de oxígeno dado. Se podría añadir que el ejercicio prolongado elevaría la frecuencia cardíaca en un  $\text{VO}_2$  dado (y el débito cardíaco). El  $\text{VO}_2$  máx. puede estar a nivel de control, pero la «performance» física a menudo resulta perjudicada. En este caso la reacción de la frecuencia cardíaca submaximal ofrece mejor predicción de la condición física real que el  $\text{VO}_2$  máx.

#### CONCLUSION

La medición del  $\text{VO}_2$  máx. ofrece una muy buena estimación del potencial del sistema cardiovascular. Un mal funcionamiento del corazón será mucho más evidente bajo situación de «stress» que en reposo. La reacción de la frecuencia cardíaca a un consumo submaximal de oxígeno dado, en un estudio longitudinal (limitado a algunos años) reflejará las fluctuaciones eventuales en el máximo poder aeróbico.

#### ¿EXISTE UNA CIFRA NORMAL DE $\text{VO}_2$ MAX.?

La figura 6 presenta las cifras de consumo máximo de oxígeno y su relación con la edad del sujeto. Todos los sujetos (muchos de ellos eran suecos) estaban clínicamente sanos y relativamente bien preparados. El punto máximo se alcanza a los 20 años y a partir de ahí el  $\text{VO}_2$  máx. declina. Parte de esta gradual reacción del  $\text{VO}_2$  máx. se debe al descenso de la frecuencia cardíaca máxima, pero el volumen sistólico también disminuye con la edad. Debe tenerse en cuenta que las variaciones individuales en el  $\text{VO}_2$  máx. son amplias; el nivel de confianza del 95 % está alrededor de  $\pm 40$  % en este grupo relativamente homogéneo de sujetos. Si incluimos aquí sujetos sedentarios y también atletas de fondo la diferencia será to-

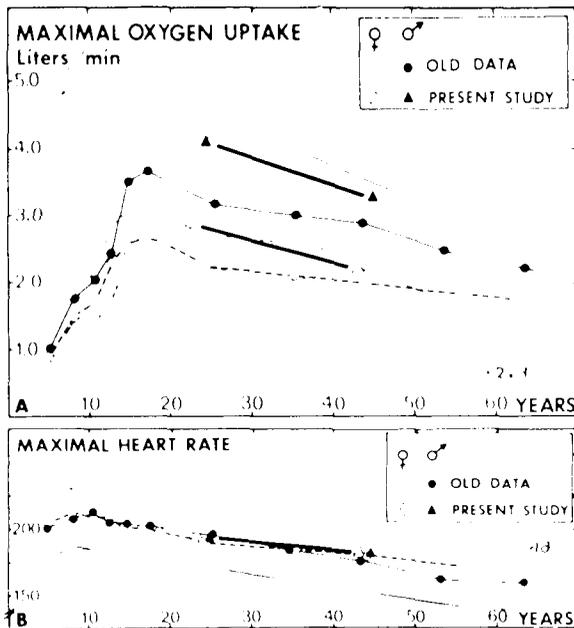


Fig. 6. — El consumo de oxígeno máximo (A) y la frecuencia cardíaca máxima (B) de estudios transversales de 350 sujetos moderadamente bien entrenados entre 4 y 70 años de edad. Círculos negros hombres, círculos blancos mujeres. Se incluyen datos de un estudio longitudinal de 66 sujetos bien entrenados.

avía más pronunciada. De aquí surgen cuatro importantes hechos:

1.º En nuestra opinión datos maximales obtenidos de una *solo test* en  $VO_2$  máx. débito cardíaco, volumen sistólico y rendimiento (por ejemplo al correr a una determinada velocidad o por un tiempo dado) no revela si el sujeto estaba desentrenado (sin condición física), habitualmente moderadamente activo, o bien entrenado (excluyendo los extremos). Consecuentemente es raro también que uno pueda, a partir de esas medidas *fisiológicas* evaluar con seguridad si un test relativamente flojo en su resultado, puede ser debido a una dotación inferior, mala condición física o enfermedad en el sistema cardiovascular. La respuesta es similar independientemente de la etiología. Por tanto es de dudoso valor comparar los resultados del test de un individuo con datos «normales». La cuestión es: ¿qué es actualmente normal para esta persona en particular? Los efectos del reposo en la cama en el sistema de transporte de oxígeno, la condición física, la hipoxia, la deshidratación y la enfermedad deben incluir varios estudios con cada sujeto sirviendo de control para sí mismo.

2.º Cuando se realiza una prueba de esfuerzo por razones clínicas (diagnóstico, pronósti-

co) se deben incluir por lo menos mediciones de ECG, presión sanguínea, y registrar síntomas y signos. Es mejor incluso, si se pueden utilizar métodos cruentos para mediciones de presiones intravasculares y contenido de gas y presiones.

3.º El consumo máximo de oxígeno proporciona una excelente estimación de la aptitud aeróbica del sujeto, es decir, su habilidad para realizar una tarea con demandas aeróbicas bien definidas (pero una *garantía* de un buen rendimiento no puede basarse sólo en el  $VO_2$  máx.). También una prueba de esfuerzo submaximal puede proporcionar bastante información: hay una «norma práctica» que dice que un trabajador que realiza trabajo manual y que puede marcar su propio ritmo de trabajo más o menos, en general acepta trabajar con un gasto de energía que es aproximadamente un 40 % de su poder aeróbico máximo.

Durante períodos de tiempo más cortos se puede trabajar sin fatiga a un 50 % del  $VO_2$  máximo. Por consiguiente, si un individuo puede trabajar durante al menos 5 minutos a una intensidad de trabajo que requiere un consumo de oxígeno de 2.5 l/min. (puede ser una carga submaximal), muy posiblemente podrá trabajar en condiciones de «steady-state» durante horas con un consumo de oxígeno de 1.0 litros/min. Otro enfoque consiste en dejarle practicar en una cinta sin fin o en un cicloergómetro con un consumo de oxígeno de 1.0 litros/min. (o algo más si esta demanda está prevista y no medida). Si no presenta síntomas clínicos, no siente fatiga, no aumenta la concentración de lactato en sangre, y la frecuencia cardíaca es baja (menor que 120 pulsaciones/min.), puede probablemente realizar un «hobby» o un trabajo que requiera un consumo de oxígeno de 1.0 litros/min. (Trabajo con pequeños grupos musculares y trabajo estático requieren como se ha mencionado demandas extra).

4.º Tal como se ha mencionado, el consumo de oxígeno proporciona importante y exacta información acerca de la producción de energía aeróbica y, con menor precisión, refleja el débito cardíaco. El consumo máximo de oxígeno, en litros/minuto tiene por tanto un significado específico.

El potencial del sujeto para mover y levantar su cuerpo se evalúa mejor cuando corregimos el consumo máximo de oxígeno según su tamaño corporal. Con un  $VO_2$  máx. de 2.8 l/m. para un hombre de 70 kgs. de peso el valor corregido sería  $40 \text{ ml.} \times \text{kg.}^{-1} \times \text{min.}^{-1}$ . Sin embargo necesitamos ambas figuras en nuestra evaluación de la aptitud circulatoria y aeróbica.

En nuestra opinión hay demasiado énfasis en la literatura en el poder aeróbico corregido según el tamaño corporal. Suponiendo que nuestro sujeto ganara 30 kgs. (tejido graso) en peso, su  $\text{VO}_2$  máx. corregido bajaría a 28 ml. x kg.  $^{-1}$  x min.  $^{-1}$ . Definitivamente su poder para levantar su cuerpo (y por consiguiente para andar o correr en la cinta sin fin con una elevación de pendiente) será modificada. Sin embargo, su  $\text{VO}_2$  máx. puede aún ser de 2.8 litros/min., y por tanto su débito cardíaco y volumen sistólico, es decir, su función cardíaca puede no ser distinta comparada con la de la situación de 70 kgs.

Durante un período de un año un paciente puede conseguir un incremento de un 15 % en su  $\text{VO}_2$  máx. (es decir, de 2.0 a 2.3 litros). Un incremento en el peso corporal de 55 a 64 kgs. enmascararía por completo esta aptitud circulatoria mejorada si el poder aeróbico máximo se expresa en relación al peso corporal. Las pruebas de esfuerzo a menudo se aplican para evaluar un tratamiento quirúrgico o farmacológico de una dolencia cardíaca. Entre 6 y 12 meses pueden transcurrir entre dos pruebas, y el peso corporal puede cambiar de forma más o menos marcada.

Durante la adolescencia chicas nadadoras bien entrenadas mejoraron su  $\text{VO}_2$  máx. (débito cardíaco y volumen sistólico), pero un cálculo del  $\text{VO}_2$  máx. por kilo de peso indica una reducción de la aptitud, ya que el incremento de grasa corporal es proporcionalmente mayor que la mejoría en  $\text{VO}_2$  máx.

Debemos diferenciar entre evaluación de la aptitud general y de la aptitud cardíaca. Para un remero y un nadador, que no se enfrentan a ninguna carrera cuesta arriba, el rendimiento se predice mejor con el  $\text{VO}_2$  máx. en litros, pero para el corredor necesitamos el ml/kg. El tejido graso tiene un índice metabólico muy bajo y bajo riego sanguíneo, y no hay razón para incluir la cantidad de tejido graso (que es a menudo una parte considerable del peso corporal) cuando evaluamos el rendimiento cardíaco. La abscisa debería entonces ser el  $\text{VO}_2$  máx. en litros/min., no en ml/kg. y por minuto.

Otro modo de expresar el consumo de oxígeno durante el ejercicio es relacionarlo con el gasto energético en reposo ( $1 = \text{MET}$ ), equivalente a aproximadamente 3.5 ml.  $\text{O}_2$  x kg  $^{-1}$  x min.  $^{-1}$ . Esta nueva, y bastante popular unidad no tiene sin embargo ninguna ventaja particular en la evaluación del rendimiento cardíaco (para ello incluye la corrección de peso corporal). No refleja directamente la carga total en el sistema de transporte de oxígeno y

además no correlaciona bien con la demanda metabólica del miocardio.

Desde luego es interesante, tanto desde el punto de vista fisiológico como clínico, relacionar el consumo máximo de oxígeno (y el débito cardíaco y el volumen sistólico) con varios parámetros (para discusión ver ASTRAND y RODAHL, cap. 10). Podemos tomar peso corporal sin grasa (masa corporal fina), tamaño del corazón (evaluado con roentgenogramas), volumen sanguíneo, cantidad total de hemoglobina y otros parámetros. Tales funciones, así como los tests de rendimiento pueden estar altamente correlacionados con el  $\text{VO}_2$  máx. La desviación de la recta de regresión es, sin embargo, mucho más crítica cuando se trata de la evaluación de un caso individual que el coeficiente de correlación. De hecho, la predicción del  $\text{VO}_2$  máx. a partir de estos valores de los parámetros mencionados está cargada de grandes errores.

En conclusión, no hay una única figura o medida que responda a todas las cuestiones relativas al estado de aptitud.

## PRUEBAS DE ESFUERZO

En nuestros estudios en fisiología del trabajo, sobre todo con sujetos clínicamente sanos de ambos sexos y varias edades, creemos que es importante medir el  $\text{VO}_2$  máx. teniendo en cuenta la edad, el peso corporal, y la talla. Es muy útil analizar las respuestas a un  $\text{VO}_2$  submaximal expresado en términos absolutos así como en relación con el  $\text{VO}_2$  máx. del sujeto. Debe considerarse la cuestión de qué prueba de esfuerzo debe usarse.

En los últimos años han aparecido varias publicaciones con discusiones de pruebas de esfuerzo en gente sana y en enfermos. A continuación presentamos una discusión reducida de los principios básicos y metodología. (Nuestra experiencia personal deriva de la utilización del test del escalón, cicloergómetro y cinta sin fin).

## TIPO DE EJERCICIO

En los experimentos de laboratorio se han aplicado tres métodos para producir intensidades standard de trabajo: Andar o correr en una cinta sin fin dirigida con un motor, trabajar en una bicicleta ergométrica y usar el test del escalón (con o sin apoyo manual). Idealmente cualquier test del sistema de transporte de oxígeno debe poseer los siguientes requisitos mínimos: 1.º El trabajo en cuestión debe implicar grandes grupos musculares. 2.º La intensidad de trabajo debe ser medible y reproduci-

ble. 3.º Las condiciones del test deben ser tales que los resultados sean comparables y repetibles. 4.º El test debe ser tolerado por la mayoría de los individuos. 5.º La eficacia mecánica (habilidad) necesaria para realizar la tarea

debe ser lo más uniforme posible en la población que va a ser medida.

Tabla 1.—Valores medios de Consumo Máximo de Oxígeno obtenidos en varios tipos de esfuerzos.

Tipo de trabajo	VO <sub>2</sub> máx.	Referencia
Correr cuesta arriba ... ..	100 %	6, 19, 20, 25
Correr en horizontal ... ..	95 % - 98 %	20
Pedalear sentado ... ..	93 % - 96 %	6, 19, 20, 25
Pedalear decúbito supino ... ..	82 % - 85 %	6
Con una pierna, sentado .....	65 % - 70 %	11
Brazos (dar vueltas a manivela) ... ..	65 % - 70 %	6
Brazos + piernas ... ..	100 %	
Nadar ... ..	85 %	22
Test del Escalón ... ..	97 %	24, 37

100 % = VO<sub>2</sub> máx. durante carrera cuesta arriba.

60 r.p.m. es óptimo para la mayoría de los sujetos.

10 % - 20 % de la carga total en los brazos; con una carga relativa mayor en los brazos el VO<sub>2</sub> máx. será menor. BÉRGH y otros: Consumo de oxígeno máximo durante ejercicio con varias combinaciones de trabajo de brazos y piernas. «J. Appl. Physiol», 1976.

La tabla 1 resume algunos estudios en sujetos sanos relativamente bien entrenados sometidos a varios ejercicios.

Estos datos son valores medios. Debería destacarse que las variaciones individuales son muy pronunciadas. Los ciclistas entrenados en general consiguen un VO<sub>2</sub> máx. superior al pedalear que corriendo. Los remeros y canoers pueden alcanzar un VO<sub>2</sub> máx. mayor en ejercicios de brazos que de piernas. Hay numerosos informes que denotan que los americanos tienen dificultades trabajando duro en el cicloergómetro debido a fatiga en las piernas. Se destaca que son ciclistas menos experimentados que los europeos. Podemos, sin embargo, concluir que hay una diferencia sorprendentemente pequeña en la VO<sub>2</sub> máx. en el «step-test», en la prueba en el cicloergómetro y en la cinta sin fin. Por tanto, puede en realidad escogerse cualquiera de ellos. Al estudiar sujetos con un «handicap» físico el test de una pierna o de un brazo puede ser la alternativa.

La cinta sin fin tiene una ventaja cuando 1) se quiere establecer el máximo VO<sub>2</sub> máx. que un individuo puede alcanzar en una prueba de laboratorio. 2) se requiere información suple-

mentaria del tiempo de trabajo a una intensidad maximal de trabajo. 3) se estudian niños.

Durante esfuerzos maximales la bicicleta ergométrica impone un mayor «stress» de piernas. Al estudiar un sujeto en el cicloergómetro con una «carga constante» (es decir, la potencia está dentro de unos límites, independiente de la frecuencia de pedaleo) el individuo debe en general pararse cuando se cansa — no puede continuar trabajando a un ritmo reducido ya que la fuerza por pedaleo sería demasiado alta. Estos ergómetros que proporcionan una fuerza proporcional a la frecuencia de pedaleo (en general con un freno mecánico) tienen la ventaja que se pueden tomar los datos mientras el sujeto está trabajando, aunque la potencia sea reducida. Sin embargo, algunos individuos tienen problemas para mantener un ritmo preestablecido y para ellos es preferible el ergómetro de «carga constante».

Los experimentos con catéteres internos y registros de ECG y presión sanguínea es más idóneo realizarlos en una bicicleta ergométrica que en la cinta sin fin o subir y bajar del escalón.

El test del escalón («step-test») es bastante difícil de conducir hasta un máximo. El ritmo de salto debe ser alto, y hay siempre un riesgo de que el sujeto tropiece cuando se acerca a la máxima intensidad de trabajo. Además, la consecuencia es, en el sujeto no habituado, dolores musculares. Las dificultades en varios registros son, por lo menos, exageradas comparados con los experimentos de la cinta sin fin.

La cinta sin fin mecánica es el aparato más caro: una máquina de adaptación universal debería cubrir un margen de velocidad de 1.5 a

16 km/h. (10 mph.) y una inclinación sobre la horizontal de hasta un 20 % ( $12^\circ$ ;  $1^\circ = 1.75\%$ ).

La bicicleta ergométrica puede ser eléctrica (más cara, debe ser recalibrada a intervalos periódicos), o mecánica (bastante menos cara; la intensidad de trabajo es proporcional a la frecuencia de pedaleo). En las pruebas de aptitud física el sujeto debe trabajar en posición sentado, y el asiento debe estar casi verticalmente sobre el centro de las bielas.

El test del escalón puede realizarse sobre simples bancos y el coste de material es por consiguiente muy modesto.

Cuando no se mide el consumo de oxígeno puede predecirse a partir de la intensidad de trabajo en el cicloergómetro ( $\text{VO}_2$  en litros/min.), velocidad e inclinación en la cinta sin fin ( $\text{VO}_2$  en ml.  $\times$   $\text{kg}^{-1}$   $\times$   $\text{min}^{-1}$ ), altura del banco y frecuencia de subida en el test del escalón ( $\text{VO}_2$  en ml.  $\times$   $\text{kg}^{-1}$   $\times$   $\text{min}^{-1}$ ). El cicloergómetro tiene algunas ventajas en la predicción del  $\text{VO}_2$  debido a su coeficiente de variación ligeramente menor. (Desde luego el  $\text{VO}_2$  máx. puede expresarse de cualquier modo con el volumen total de  $\text{VO}_2$  y el peso corporal conocido). Durante un esfuerzo muy intenso el consumo de oxígeno previsto puede ser demasiado alto ya que los procesos anaeróbicos pueden intervenir en la energía total producida.

### PROCEDIMIENTO

Una prueba de esfuerzo debería estandarizarse. Cuando se consideran todas las variables la bicicleta ergométrica y la cinta sin fin aparecen como mejores comparadas con el test del escalón, y limitaremos nuestra discusión a esas modalidades de examen.

Un test maximal debería siempre ir precedido de un test submaximal. Hay un acuerdo general de que un test de múltiples estadios (la carga de trabajo se incrementa a intervalos regulares hasta que se alcanza el punto final) tiene algunas ventajas definitivas comparado con un test de carga única (una carga de trabajo submaximal y constante). La figura 7 muestra esquemáticamente los varios métodos aplicados en pruebas de esfuerzo. *El test de los dos escalones* es un ejemplo de prueba submaximal, de un solo estadio, hoy en día considerada anticuada.

En las pruebas de cargas progresivas el trabajo puede ser aumentado gradualmente con varias cargas submaximales, y eventualmente también maximales y «supermaximales»: el tiempo de trabajo es de tres minutos como mínimo en cada período, con (fig. 7:2) o sin (fig. 7:3)

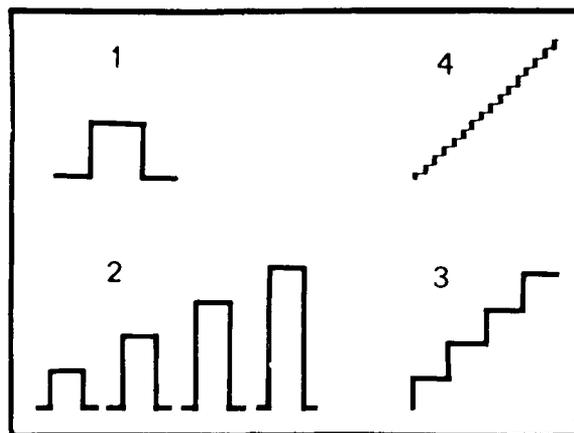


Fig. 7. — Varios tipos de pruebas de esfuerzo («abscisa» = tiempo; «ordenada» = intensidad de trabajo).

períodos de descanso intermedios. Alternativamente, la intensidad de trabajo puede aumentarse gradualmente cada minuto o cada dos minutos (fig. 7.4). Con el tiempo de trabajo prolongado hay más posibilidades de un «steady-state» (equilibrio), es decir, el consumo de oxígeno iguala las necesidades de los tejidos. (Ejemplos: en «Bruce's multi-stage treadmill test» hay hasta VI estadios, cada uno de 4 min. de duración sin períodos de descanso: I: 1.7 mph., 10 % grados; II: 2.5 mph., 12 % grados; III: 3 mph., 14 % grados; IV: 4.2 mph., 16 % grados; V: 5.0 mph., 18 % grados; VI: 5.5 mph., 20 % grados). El punto final lo marcan los límites individuales de esfuerzo máximo posible o tolerado, o alteraciones patológicas del ECG de significación específica, o síntomas o señales indicando enfermedad.

En el protocolo de TAYLOR la velocidad se mantiene (7 millas por hora), pero la inclinación de la cinta se incrementa gradualmente (0 %, 2.5 %, 5 %, etc.). El tiempo de trabajo es de unos 3 minutos en cada período, y el individuo descansa entre ellos (distintos períodos de tiempo, desde 5 minutos hasta 24 horas o más, según el proyecto). Esta prueba se utiliza bastante, ya que su intención es hallar el  $\text{VO}_2$  máx. del sujeto.

La prueba de BALKE pertenece al grupo 4 en la figura 7. La velocidad se mantiene constante (por lo general 3.4 millas por hora) y la pendiente se incrementa 1 % cada minuto o en el protocolo modificado 2 % cada dos minutos.

NAGLE y otros han recomendado que los pacientes con un poder aeróbico máximo supuestamente bajo empiecen a 2 mph. en una pendiente de grado cero. La velocidad se mantiene

entonces constante y el grado de pendiente aumenta 3.5 % cada tres minutos.

El Comité Escandinavo de Clasificación de ECG recomendaba al examinar pacientes usar el cicloergómetro y un incremento gradual de intensidad de trabajo cada 6 minutos. La carga inicial y el incremento de resistencia están adecuados a la aptitud física de los sujetos.

Actualmente hay muchos protocolos que se utilizan para pruebas de esfuerzo. Las pruebas de esfuerzo se introdujeron recientemente en la fisiología clínica y es por tanto natural que los pioneros desarrollaran sus propios protocolos. Será difícil conseguir un método standard aceptado internacionalmente, y no creemos que esto sea deseable. Los motivos de un test de esfuerzo varían: el sujeto puede ser un paciente cardíaco, alguien que quiere consejo antes de empezar un programa de entrenamiento, un deportista evaluando su condición física, etc. Si la finalidad de un test es establecer un diagnóstico será suficiente con un «stress» submaximal; si se quiere una medida del límite funcional del sujeto se le debe llevar al máximo. En la investigación puede interesar un estudio de cómo los factores ambientales afectan a varias funciones, y las mediciones que se hagan deben adecuarse al problema específico. Estos factores inevitablemente influirán en la elección del protocolo, incluyendo la duración del esfuerzo, demandas para condición de equilibrio, etc.

Algo puede fallar durante un experimento debido a dificultades técnicas, la respuesta del sujeto-paciente puede requerir una atención extra y por tanto, es una desventaja estar estrictamente condicionado por un protocolo rígido. Una prueba de esfuerzo es inevitablemente un compromiso con respecto al material, tiempo disponible en comparación con el «stress» deseado y la incomodidad del sujeto.

#### PUNTO FINAL DE LAS PRUEBAS

Para determinaciones del  $\text{VO}_2$  máx. se espera que los distintos protocolos (fig. 7), cuando están correctamente aplicados, den los mismos niveles máximos. FROELICHER y col. sin embargo han comunicado recientemente unos valores medios más altos del  $\text{VO}_2$  máx. (+ 7 — + 10 %) con el protocolo de TAYLOR comparado con los protocolos de BRUCE y BALKE. Un requisito absoluto en este contexto es que se use un criterio objetivo para la evaluación de que se ha alcanzado realmente el  $\text{VO}_2$  máx. del sujeto (no más aumento en el  $\text{VO}_2$  a pesar de que se incremente la intensidad de trabajo; alta concentración de lactatos sanguíneos o musculares). En sujetos aptos y bien motivados el

$\text{VO}_2$  máx. se alcanza de hecho a intensidades submaximales de trabajo — no es necesario «agotar» el poder anaeróbico tampoco (fig. 2).

Cuando se deja al sujeto la decisión del punto final, o se detiene la prueba por otras razones (por ejemplo marcada depresión de la S-T) el consumo de oxígeno así medido no debería llamarse «máximo  $\text{VO}_2$ ».

Debería resaltarse que los sujetos con un poder aeróbico máximo alto sometidos al mismo protocolo que sujetos no preparados o pacientes cardíacos realizarán la prueba de estadios-múltiples por períodos de tiempo más largos. Con una temperatura en la habitación superior a los 20° C. y deficientes condiciones de circulación de aire (sin ventilador) la carga de calor y la tolerancia al calor y no el  $\text{VO}_2$  máx. limitarán ocasionalmente el rendimiento.

BRUCE aboga por el uso de la prueba máxima incluso para pacientes cardíacos (con algunas excepciones), mientras que otros creen que es más seguro limitar las pruebas a intensidades submaximales de trabajo. BLOMQVIST y otros (BLACKBURN) han comunicado que el grado de depresión de S-T si aparece en el ECG aumentará con mayor consumo de oxígeno (y débito cardíaco) hasta el máximo. Al examinar pacientes con fines diagnósticos o pronósticos en nuestra opinión es todavía una cuestión abierta el hecho de qué ventajas se obtienen con la prueba maximal comparadas con las desventajas de tal prueba. De hecho pueden surgir más casos de los llamados falso-positivo en la prueba maximal. La submaximal puede concluir con algunos casos falso-negativo. Pero, ¿cuáles son las cifras respectivas?

El Comité Escandinavo de Clasificación de ECG recomendaba que la prueba submaximal se terminara a una predeterminada frecuencia cardíaca: para el grupo de edad entre 20-29 años a 170 pulsaciones/minuto; 30-39 años a 160; 40-49 años a 150; 50-59 años a 140; 60-69 años a 130 pulsaciones/minuto.

La base de esta frecuencia tope es la siguiente: La frecuencia cardíaca máxima declina con la edad (fig. 6). Los valores medios son del orden de 220 menos la edad del sujeto en años. La desviación estandard (SD) es de unas 10 pulsaciones/minuto. Tomando 195 menos la edad del sujeto en años como punto final significa que sólo un sujeto de cada 200 es sometido a su frecuencia cardíaca máxima ( $2.5 \times 1 \text{ SD} = 25$  pulsaciones/minuto). Como promedio los sujetos trabajan hasta un 85 % de su frecuencia cardíaca máxima, que corresponde al 75 %-85 % de su  $\text{VO}_2$  máx. Es durante el intervalo entre el 80 % y el  $\text{VO}_2$  máx. que la concentra-

ción de lactato aumenta rápidamente produciendo en consecuencia hiperventilación y fatiga.

Debe recordarse que este punto final está basado en valores medios y que su variabilidad inter-individual es notable. Por lo tanto, en un grupo de 200 sujetos de 45 años de edad ejercitados hasta la frecuencia tope de 150 pulsaciones/minuto (195-45) uno de ellos puede estar trabajando al máximo, pero otro se para 50 pulsaciones/min. por debajo de su techo (220-45 + 2.5 x 10 = 200 pulsaciones/min.).

Considerando la amplia dispersión en frecuencias cardíacas máximas recogida en la literatura tiene poco sentido ser muy sofisticado en la elección de una frecuencia cardíaca tope. Subirla o bajarla 5-10 pulsaciones/min. no ayudará significativamente al evaluar el resultado de una prueba individual. De nuevo, la SD sería de  $\pm 10$  pulsaciones/min. y por tanto el margen extremo para un nivel de significación del 1 % es 50 pulsaciones/min.

Las Normas Escandinavas son bastante fáciles de recordar, y han superado la prueba de tiempo. Por el momento no disponemos de una alternativa mejor para la elección del punto final submáximo. (Un análisis de la concentración de lactato en sangre al fin del ejercicio proporcionaría un indicio acerca de si el sujeto trabajaba cerca de su máximo o no, es decir, de si la energía anaeróbica producida era significativa).

Otro enfoque sería sólo simular en una cinta sin fin o en un cicloergómetro la demanda energética del trabajo del individuo y o la actividad durante el tiempo libre (fig. 1), y anotar la frecuencia cardíaca, ECG, y los síntomas. Al prescribir un programa de entrenamiento específico, sus efectos circulatorios previstos pueden ser estudiados primero en una prueba de esfuerzo estandarizada simplificando los registros de ECG y presión sanguínea. Se debería incluir en tales pruebas un margen de seguridad razonable con vistas a la frecuencia metabólica.

**NOTAS** Especialmente en el examen de pacientes con problemas cardiovasculares el final de la prueba puede ser debido a malestar o síntomas como angina, disnea inapropiada, dolor intenso en la pierna, desmayo y vértigos, cambios anormales en el ECG, como latidos ventriculares sucesivos o cambios isquémicos de la ST, o una presión sistólica que no aumenta o incluso descende a medida que aumenta la intensidad del trabajo.

## MEDICIONES

Es ventajoso medir el consumo de oxígeno durante la prueba. Al usar analizadores de gases electrónicos ha de tenerse cuidado de corregir la presión de agua en el gas espirado en relación con el gas usado en el calibraje. (¡De otro modo el error puede ser hasta de un 25 % en  $\text{VO}_2$  calculado!). Se requiere un mínimo de 3 minutos antes de que se alcance el «steady-state». Durante ejercicio maximal es una ventaja hacer por lo menos dos mediciones sucesivas. Si el segundo valor de  $\text{VO}_2$  no supera al primero (diferencia menos de 0.1 litros/min.) entonces seguramente se había obtenido el máximo. Con cicloergómetros y cintas sin fin bien calibrados el consumo de oxígeno puede, como se ha dicho, calibrarse a partir de la intensidad de trabajo. Sin embargo durante un trabajo muy intenso parte de la demanda energética puede ser satisfecha por procesos anaeróbicos. Al expresar la capacidad de trabajo en vatios o tiempo de trabajo puede por tanto incluir tanto la fracción aeróbica que carga la circulación como una fracción anaeróbica sin relación con el trabajo cardíaco.

El coste energético de correr («jogging») a poca velocidad es mucho más alto que el de andar (fig. 3) y por tanto puede ser una desventaja el cambiar la velocidad en la prueba de la cinta sin fin. Habrá una velocidad a la que algunos sujetos prefieran andar (piernas largas) pero otros correr. El consumo de oxígeno será bastante diferente, y no puede ser predicho sólo a partir de la velocidad.

La frecuencia cardíaca debería medirse por lo menos cada minuto. En una prueba por razones médicas el ECG debería ser monitorizado (y la velocidad del papel calibrada frecuentemente). En pacientes con arritmias (establecidas o sospechadas) es necesario un registro continuo de ECG.

La presión sanguínea puede medirse indirectamente con el brazal. La presión diastólica (en el punto en que el ruido de KOROTKOW cambia de carácter 4.<sup>a</sup> fase) puede ser difícil de notar. La figura 8 presenta los datos en reposo de gente de mediana edad con presiones sanguíneas normales.

Según KITAMURA y otros en hombres sanos jóvenes hay una alta correlación ( $r = 0.88-0.90$ ) entre el riego sanguíneo coronario y el consumo de oxígeno miocárdico y el producto de la frecuencia cardíaca y la presión sistólica medida en la aorta. Debe resaltarse que en sujetos sanos la presión sistólica medida en una arteria periférica es más alta que en la aorta.

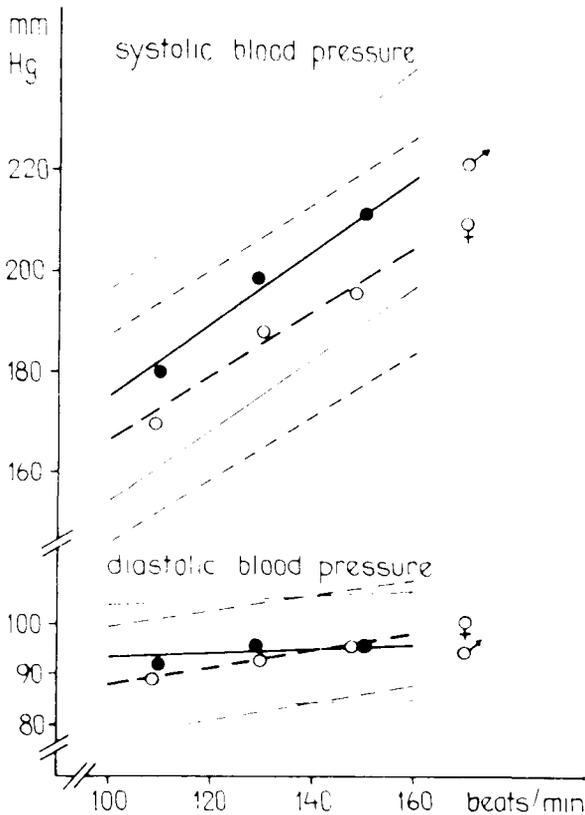


Fig. 8. — La presión sistólica y diastólica medidas indirectamente (brazal y manómetro de mercurio) en relación con la frecuencia cardíaca durante el esfuerzo en un cicloergómetro. Los sujetos eran 103 mujeres (líneas continuas) y 80 hombres (líneas de puntos), con presión normal en reposo, edades medias 5 años (límites extremos 48-63). La línea delgada indica  $\pm 1SD$ . Las medias de presión sistólica y diastólica para los distintos grupos de frecuencia cardíaca también se indican (círculo blanco = mujeres, círculo negro = hombres).

(Ello se debe en parte a la distorsión en la transmisión a causa de la suma de las olas centrifugas y de las olas reflectadas de la periferia. Sin embargo en pacientes mayores con lesiones degenerativas arteriales la ola de presión se transmite virtualmente sin cambios en apariencia). En segundo lugar, con la presión sanguínea con brazal sólo se mide la energía de presión (presión lateral) y no la energía cinética de la sangre, que aumenta notablemente con un débito cardíaco aumentado. Por estas razones es actualmente difícil interpretar el significado del producto de la frecuencia cardíaca y la presión sistólica medida indirectamente, y su relación con el trabajo del corazón. Cuanta más sangre y oxígeno pueda el corazón aportar a los músculos que trabajan a un flujo

dado de sangre coronaria y a un índice metabólico miocárdico dado, tanto mejor será el rendimiento cardíaco.

De nuevo, el consumo de oxígeno debería calcularse para esta evaluación en litros/minuto y no corregirse según el peso corporal del sujeto. A destacar que con entrenamiento físico la frecuencia cardíaca, y en muchos casos también la presión sistólica descienden para un consumo de oxígeno total dado. Esto tiende a reducir el producto frecuencia cardíaca, presión sanguínea que a su vez indica una función cardíaca mejorada.

Concentración de lactato en sangre es una buena medida indirecta de cuán cerca está trabajando el sujeto de su máximo poder aeróbico. Una gota de sangre tomada de la punta del dedo es suficiente para el análisis. Otro signo de producción parcial de energía anaeróbica es una relativa hiperventilación, es decir, el volumen espirado de  $CO_2$  excede el producido. Inevitablemente el cociente respiratorio (la proporción de los volúmenes de  $CO_2/O_2$  en el aire espirado) aumentará, y puede estar por encima de 1.0. Al final de cada estadio de esfuerzo se ha mostrado como bastante eficaz preguntar al sujeto acerca de la proporción subjetiva de ejercicio percibido. BORG ha propuesto una escala que consiste en 15 grados de 6 a 20 (7 = «muy, muy suave», 9 = «muy suave», 11 = «bastante suave», 13 = «algo pesado», 15 = «pesado», 17 = «muy pesado», 19 = «muy, muy pesado»). En muchas situaciones la frecuencia cardíaca refleja el esfuerzo físico experimentado subjetivamente. El cuestionario puede ser extendido a una escala de fatiga general, fatiga de piernas, disnea, etc.

Estas medidas simples proporcionan buena información acerca de la capacidad aeróbica del sujeto y de su función cardíaca. Cuestiones específicas requieren la aplicación de métodos adicionales más o menos complicados para ser analizadas o contestadas, pero está fuera del propósito de este trabajo cubrir este tema.

## COMENTARIOS GENERALES EN EL PROCEDIMIENTO

### *Variabilidad en los resultados de las pruebas:*

La primera vez que alguien se somete a una prueba de esfuerzo la frecuencia cardíaca puede ser casi 10 ó 15 pulsaciones/min. más alta que en la segunda prueba hecha al día siguiente. El consumo de oxígeno puede también ser mayor ( $> 0.1$  l/min.) para una intensidad de trabajo dada durante la primera prueba com-

parada con la segunda. La razón de tales discrepancias es en parte relación emocional con el procedimiento del test y su resultado, y en menor parte una función del aprendizaje de andar o correr en una cinta sin fin o pedalear en un cicloergómetro. En un proyecto de investigación es por tanto importante repetir la primera prueba e incluso los resultados de esta primera prueba deben ser desechados. Por otra parte, cuando los datos se han obtenido bajo condiciones debidamente estandarizadas la variabilidad —día a día— es muy pequeña en  $\text{VO}_2$  máx., frecuencia cardíaca máxima,  $\text{VO}_2$  submaximal y frecuencia cardíaca ( $\text{VO}_2$  2 % - 4 %, frecuencia cardíaca 2 - 4 latidos/minuto).

Como se ha discutido anteriormente un cambio en la frecuencia cardíaca submáxima y un cambio en el consumo de oxígeno estandar es en la mayoría de los casos una consecuencia de un cambio proporcional pero recíproco en el volumen sistólico. De nuevo habría que remarcar que el consumo de oxígeno calculado por kilo de peso corporal en una cinta sin fin no refleja directamente el consumo de oxígeno total, el débito cardíaco, y la función miocárdica. En los estudios longitudinales la bicicleta ergométrica tiene por tanto una ventaja comparada con la cinta sin fin y test del escalón, ya que se puede de vez en cuando aplicar fácilmente el mismo «stress» al sistema de transporte de oxígeno (limitando eventualmente el protocolo de la prueba a una intensidad de trabajo). Una variación en el peso corporal causará una modificación proporcional en el consumo de oxígeno en la cinta sin fin o en el test del escalón, y por tanto en el débito cardíaco y en la frecuencia cardíaca (y metabolismo miocárdico) pero la función cardíaca en sí puede no ser afectada.

Ya se ha mencionado que correr a una velocidad dada en la cinta sin fin ocasiona un gasto energético distinto que andar. El variar la frecuencia de zancada puede también cambiar el  $\text{VO}_2$ . Si el sujeto se apoya sujetando la barandilla el gasto energético descenderá. En una bicicleta ergométrica un cambio en la frecuencia de pedaleo puede modificar la eficacia. Si el consumo de oxígeno no se mide sino que se deduce de la intensidad externa de trabajo es esencial estandarizar todos esos factores para mantener la variabilidad al mínimo.

#### TIEMPO DE TRABAJO

Cuando interesan medidas durante esfuerzo submaximal es útil realizar los estudios en estado de equilibrio (steady-state: consumo de oxígeno = demanda de oxígeno) o cerca de las

condiciones de equilibrio (fig. 7: 2 y 3). En un procedimiento continuo (fig. 7: 3) 3 minutos por estadio pueden ser suficientes. Con los métodos tradicionales de determinación del consumo de oxígeno la recogida del aire espirado requiere por lo menos 1 minuto en ejercicio suave y 3 minutos quizás no serían suficientes. Estos protocolos también dan más flexibilidad en el procedimiento y se pueden comparar los resultados de la prueba aunque se haya variado el tiempo de trabajo para permitir más o menos mediciones de tiempo de consumo. En los estadios múltiples, el test del estado de equilibrio se puede calcular por interpolación de la frecuencia cardíaca y otros parámetros a cualquier consumo de oxígeno dentro del margen estudiado. El inconveniente del tiempo aumentado en un protocolo diseñado para obtener condiciones de estado de equilibrio puede ser compensado reduciendo el número de estadios necesarios para cargar al sujeto hasta el punto tope. Si el propósito principal de la prueba es determinar la tolerancia de trabajo del sujeto, el procedimiento más rápido ilustrado en la figura 7: 4 tiene algunas ventajas.

#### INCREMENTO DE TRABAJO

El examen clínico de sujetos en reposo y la historia médica deberían ser la información básica sobre la que decidir qué tipo de procedimiento de esfuerzo se aplica. La intensidad inicial de trabajo y el incremento de intensidad de trabajo por razones prácticas no debería ser igual para pacientes cardíacos severamente limitados, sujetos sanos «normales» y deportistas. La carga inicial en la bicicleta ergométrica puede ir desde pedalear sin fricción hasta 150 w. (900 kpm/min.), y los intervalos desde 25 hasta 100 w. con el protocolo del «steady-state». Al incrementar la intensidad de trabajo cada minuto los intervalos pueden ser 10 ó 20 w. (eventualmente con intervalos mayores al principio y mantener cuando se vuelve crítico). En la cinta sin fin hay algunas ventajas en mantener la velocidad constante y el primer estadio puede ser con la cinta corriendo horizontalmente o en inclinación. El grado de incremento puede ser 1.0 %, 2.5 % ó 5 % por intervalo.

#### MISCELANEA

En nuestra investigación sobre el ser humano como «máquina de trabajar» a menudo usamos bicicletas ergométricas para estudiar la respuesta a esfuerzo submaximal pero aplicamos la prueba de la cinta sin fin cuando se trata de

la máxima capacidad de trabajo. Una evaluación comprensiva de un paciente debería en muchos casos seguir dos protocolos, es decir, según el procedimiento del estado de equilibrio (fig. 7: 2 ó 3) y según el caso más rápido de estado de no equilibrio (fig. 7: 4).

Debe destacarse que muchas actividades físicas en trabajos y actividades de tiempo libre son de naturaleza intermitente. De hecho se puede realizar un trabajo bastante pesado con «stress» moderado en el sistema de transporte de oxígeno y poca fatiga si los períodos de trabajo se limitan a menos de 30 seg. con frecuentes períodos intermedios de descanso o actividad ligera. Durante el esfuerzo, el oxígeno almacenado con la mioglobina puede ser utilizado, y durante los períodos intermedios de descanso los depósitos de oxígeno pueden volverse a llenar. Por tanto los sujetos con un poder aeróbico máximo relativamente bajo pueden realizar tareas que requieran bastante demanda física si pueden adaptarlo a un programa intermitente. No es real simular un tipo de trabajo estandarizado intermitente en una prueba de laboratorio. Como la demanda en el trabajo intermitente en comparación con el ejercicio continuo para la misma intensidad de trabajo, se va sobre seguro al evaluar el potencial del sujeto con las pruebas de esfuerzo tradicionales.

### PRECAUCIONES

En los programas clínicos se recomienda y es una práctica aceptada que la prueba de esfuerzo sea supervisada por un médico. El riesgo de accidentes serios en conexión con la prueba es muy pequeño. Según BRUCE sobre más de 10.000 pruebas de estadios múltiples en la cinta sin fin se dieron sólo dos casos de fibrilación ventricular, uno en un sujeto normal tras una ducha caliente, y otro en un paciente con angina de pecho inmediatamente después del ejercicio. El índice de mortalidad por ahora es cero. El infarto de miocardio se ha producido en menos de 1 entre 2.500 pacientes previamente seleccionados. Otros han comunicado muertes, pero las estadísticas son poco claras.

En Suecia se han realizado unas 100.000 pruebas de esfuerzo submáximas por parte de asistentes no médicos en sujetos no seleccionados, supuestamente sanos, no sometidos a examen clínico antes de la prueba, sin ninguna alteración o accidente comunicados. Estas pruebas son parte del programa de educación física bajo el lema «deporte para todos».

Ya que no pueden excluirse riesgos, debería realizarse un examen clínico antes de la prueba a todos los pacientes. Debería haber monitorización profesional del ECG durante la prueba, y se deberían establecer criterios para parar las pruebas. Se debería recomendar a los pacientes que no tomaran duchas calientes o baños dentro de los 30 minutos siguientes a la prueba.

Durante la recuperación a veces es mejor tener a los pacientes sentados en una silla que en posición supina (por ejemplo en pacientes con hipertensión pulmonar). Se debería establecer un plan de emergencia. Debería haber acceso libre a un equipo de emergencia (por ejemplo aporte de oxígeno, desfibrilador) y medicamentos necesarios para el cuidado médico.

### PREDICCIÓN DE LA APTITUD FÍSICA A PARTIR DE PRUEBAS DE ESFUERZO SUBMÁXIMAS

Se han desarrollado varios métodos para predecir el consumo de oxígeno máximo a partir de los datos obtenidos durante pruebas submáximas. Como ya se ha discutido más arriba no hay medidas en el sujeto en reposo que tengan una correlación suficientemente alta con el  $VO_2$  máx. para aplicarlas en tal predicción. La mayoría de esos métodos indirectos se basan en la relación más o menos lineal entre la frecuencia cardíaca en el esfuerzo y el consumo de oxígeno: se hace una extrapolación a partir de la frecuencia cardíaca máxima medida en el sujeto o prevista según su edad, y el consumo de oxígeno correspondiente se lee en la abscisa. El nomograma de ASTRAND se ha usado bastante extensamente. De hecho no se basa en sofisticadas teorías acerca de tales relaciones sino simplemente en hallazgos empíricos. Cuando hombres jóvenes trabajan al 50 % de su  $VO_2$  máx. sus frecuencias cardíacas alcanzan un promedio de 128 pulsaciones/minuto; en mujeres las frecuencias cardíacas son de 138. De datos similares se construyó un nomograma. Se derivó un factor de corrección para sujetos mayores a partir del cociente entre el  $VO_2$  máx. medido y el predicho. Las frecuencias cardíacas máximas no se consideraron.

Cualquier predicción del  $VO_2$  máx. a partir de pruebas submáximas tiene un error estándar estimado de un 10 % - 15 %. Una fuente de error es la gran variación en frecuencia cardíaca máxima, y otra la falta de linealidad en la relación frecuencia cardíaca  $VO_2$  en muchos sujetos a altas intensidades de trabajo.

Como pruebas de criba se pueden hacer predicciones groseras. Usualmente aplicamos el mencionado nomograma y sometemos al sujeto a una carga de trabajo que requiere el esperado  $\text{VO}_2$  máx. más 10 % de tal valor. Según la marcha del trabajo hay eventualmente un ajuste de la intensidad de trabajo debido a los síntomas del sujeto, grado de agotamiento y ritmo respiratorio. La meta es conseguir un tiempo de trabajo de 3-5 minutos. Con una carga submáxima y una máxima este protocolo requiere un tiempo mínimo. Para pacientes con arritmias más o menos continuas no se pueden hacer predicciones a partir de las medidas de frecuencia cardíaca.

### SUMARIO

1. Cada tipo de ejercicio es en un sentido una situación única. Sin embargo, todos los tipos de trabajo muscular aumentan la intensidad metabólica y por tanto es de particular interés analizar la participación del sistema de transporte de oxígeno. El consumo de oxígeno proporciona una exacta medida del poder aeróbico, y está altamente relacionado con el débito cardíaco.

El  $\text{VO}_2$  máx. es bajo condiciones estandarizadas una característica fácilmente reproducible de la capacidad aeróbica del sujeto. Está, sin embargo, sujeto a variaciones bajo determinadas condiciones (es decir, tras prolongada inactividad, después del entrenamiento, como consecuencia de una lesión cardíaca).

El factor principal tras tales cambios en el  $\text{VO}_2$  máx. es los cambios proporcionales en el volumen sistólico. Por tanto un registro de la frecuencia cardíaca durante el esfuerzo a un determinado consumo de oxígeno, reflejará tales variaciones en estudios longitudinales. Hablando en general, una frecuencia cardíaca alta se asocia generalmente con un volumen sistólico. Sin embargo, a partir de esta información no se puede decir si esta respuesta deficiente al esfuerzo se debe a factores genéticos, falta de entrenamiento, función cardíaca alterada u otros factores.

2. Se han presentado datos que sugieren que el transporte máximo de oxígeno (débito cardíaco, contenido de oxígeno en la sangre arterial) está limitado por la circulación central más que por la capacidad de los tejidos para utilizar el oxígeno.

3. Una prueba de esfuerzo de estadios múltiples en una cinta sin fin o en un cicloergómetro proporcionará una medida de la cantidad

de trabajo que el sujeto es capaz de tolerar sin síntomas o irregularidades electrocardiográficas.

4. Para una predicción de la capacidad del sujeto para hacer un trabajo debería calcularse el consumo máximo de oxígeno por kilo de peso corporal. Sin embargo, una evaluación del rendimiento cardíaco debería basarse en el transporte total de oxígeno ( $\text{VO}_2$  litros min.), ya que esto correlaciona con el gasto cardíaco, el consumo miocárdico de oxígeno y el flujo sanguíneo. Variaciones en el contenido de grasa corporal no producen cambios similares en la dimensión de los músculos, corazón, volumen de sangre, etc. y demandas de flujo sanguíneo local. En otras palabras, en un grupo heterogéneo de individuos el  $\text{VO}_2/\text{kg}^{-1}/\text{min}^{-1}$  no está relacionado con la capacidad actual de sus corazones. Una buena medida del rendimiento cardíaco es la proporción de consumo de oxígeno/frecuencia cardíaca (Pulso de oxígeno).

5. No hay un protocolo de prueba ideal para todas las situaciones. Se recomienda que uno adapte la carga inicial de trabajo y el incremento en la intensidad de trabajo al poder máximo asumido de la persona examinada. El tiempo de trabajo de cada estadio debe ser si es posible de por lo menos 3 minutos: cuanto mayor sea el incremento en intensidad de trabajo, mayor debe ser el tiempo de trabajo en cada estadio. Si el propósito principal de la prueba de esfuerzo es establecer el  $\text{VO}_2$  máx. o la tolerancia al trabajo limitada por los síntomas se puede aplicar un protocolo de estado de desequilibrio con 1-2 minutos cada estadio.

6. Para el investigador que está dispuesto a aceptar el pequeño pero claro riesgo implicado, la prueba de estadios múltiples llevada hasta el límite de los síntomas o poder máximo, proporcionará los resultados más claros, especialmente para una diferenciación entre pacientes normales y pacientes con lesiones coronarias.

7. Una alternativa es terminar la prueba de esfuerzo de estadios múltiples a una frecuencia cardíaca cercana a 195 — menos la edad del sujeto en años. Para la mayoría de los sujetos esto representa una prueba submáxima. La tercera alternativa es simular en la bicicleta ergométrica o en la cinta sin fin el índice metabólico del trabajo del sujeto o de sus actividades recreativas.

Las pruebas de estadio único o de estadios múltiples repetidas proporcionan excelentes medidas de las variaciones en la condición física (cambios en el peso corporal deben tenerse en cuenta en la cinta sin fin).