

Adaptación respiratoria al esfuerzo

DR. RAIMUNDO CORNUDELLA MIR.

Todo esfuerzo determina modificaciones cuantitativas y cualitativas de la respiración tisular a nivel de los músculos interesados. Tales modificaciones necesitan la puesta en juego de numerosas regulaciones y la participación de numerosas funciones. Vamos a polarizar nuestro análisis a los fenómenos respiratorios de adaptación al trabajo.

La adaptación de una persona normal al esfuerzo no es instantánea ni idéntica para los diversos parámetros o variables de la respiración. Después de un tiempo de arranque o *período de adaptación*, caracterizado por el aumento de los diferentes parámetros y la ruptura de su paralelismo, estos alcanzan, si el ejercicio es bien tolerado y en un tiempo variable según su intensidad, un nuevo nivel de equilibrio que no es simultáneo para todos ellos: es el *período de equilibrio*. Tal estado de equilibrio no se logra cuando el trabajo sobrepasa cierta intensidad. Una vez acabado el esfuerzo, el *período de recuperación* constituye una nueva etapa de régimen inestable caracterizada por un retorno progresivo de las diferentes variables al estado de equilibrio existente antes del esfuerzo.

El estudio preciso de esta evolución en el curso del esfuerzo ha obligado a los fisiopatólogos a adoptar un tipo de pruebas de duración suficiente para que los diferentes parámetros cardio-respiratorios alcancen un estado de equilibrio, llamado también régimen estable o «steady state». El estudio de los intercambios respiratorios en el curso de esfuerzos de larga o mediana duración, a potencia o carga constante y bien tolerados, ha puesto de manifiesto que el establecimiento de un régimen estable es de instauración lenta, alrededor de los 10 minutos, proporcional a la intensidad del esfuerzo realizado, tal como han afirmado y confirmado los estudios de la escuela de Lausanne,

con FLEISCH, y de Nancy, con SADOUL. Por otro lado, el establecimiento de un nuevo estado de equilibrio no es simultáneo para todos los parámetros respiratorios: el primero en alcanzar un equilibrio es la toma o consumo de oxígeno seguido por la eliminación del gas carbónico y más tarde por la ventilación. El aumento continuo de la frecuencia cardíaca y de la temperatura corporal así como el descenso de las reservas de glucógeno del organismo hacen ilusoria la pretensión de alcanzar un estado de equilibrio perfecto prolongando indefinidamente la duración del esfuerzo.

Se trata pues, en definitiva, de un estado de equilibrio aproximado. Como afirma el profesor FLEISCH, fisiológicamente no se alcanza jamás un estado de equilibrio; aunque se efectúe un trabajo liviano a la larga aparece la fatiga y, por consiguiente, un desequilibrio. Por tanto, cuando hablamos de un estado de equilibrio no nos referimos al sentido matemático del término sino que aceptamos un cierto grado de variación que no es idéntica para todos los parámetros: para el consumo o toma de oxígeno es del orden de un 2 por 100 y para la ventilación minuto y la eliminación de anhídrido carbónico es de un 5 a 10 por 100.

Aún en sujetos normales, la instalación de un régimen estable no es posible cuando el trabajo sobrepasa una cierta intensidad: los intercambios quedan entonces permanentemente por debajo del nivel del metabolismo. Este límite varía según las características físicas del sujeto, el sexo, su fatiga, su entrenamiento y también según el tipo de esfuerzo. En tales condiciones se produce en la sangre un acúmulo de metabolitos intermediarios de la contracción muscular, cuyo testigo más fácilmente do-

sificable es el ácido láctico, que actúan sobre la ventilación.

Hay que tener en cuenta que en la realización de las pruebas de esfuerzo tienen valor no sólo la duración del ejercicio y la potencia ó carga del esfuerzo, a los que acabamos de referirnos, sino también la frecuencia de los movimientos de ejecución. Se ha demostrado que para una potencia dada el rendimiento es tanto mejor cuanto menor sea la frecuencia de las contracciones musculares, ya que el consumo de oxígeno se eleva al aumentar éstas; ello ha llevado al concepto de *frecuencia óptima* que varía en relación a la potencia del esfuerzo.

Vamos a referirnos más detalladamente a la evolución de la adaptación fisiológica de los parámetros respiratorios al esfuerzo en el curso de las pruebas de trabajo a potencia constante y duración media, bien toleradas, en el adulto sano y a sus variaciones en función de ciertos factores.

EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS RESPIRATORIOS EN EL CURSO DEL ESFUERZO

La evolución de los parámetros respiratorios en el curso de un ejercicio bien tolerado, de potencia constante y duración media en una persona sana puede esquematizarse de la siguiente manera:

Ventilación minuto

Desde el inicio del ejercicio, la ventilación minuto o débito ventilatorio se eleva muy rápidamente durante los primeros minutos para entecerse después poco a poco hasta el fin del esfuerzo. Este aumento de la ventilación es más precoz que el de la toma de oxígeno y el de la eliminación de anhídrido carbónico. Durante el período de régimen estable, alcanzado alrededor del décimo minuto, la curva rápidamente ascendente en su primera parte, tiende a horizontalizarse y dibuja una meseta ligeramente ascendente. La pendiente depende de la potencia del esfuerzo; cuanto menor sea su intensidad tanto más se acercará a la horizontal. Este aumento ligero y continuo de la ventilación sería para FLEISCH consecuencia del acúmulo de metabolitos ácidos a nivel de la célula.

Se puede admitir la existencia de un régimen estable aproximado si la pendiente de esta meseta entre el décimo y el vigésimo minuto del ejercicio es inferior o igual a un 5-10 por ciento. El retorno a la ventilación de base se hace en 5-7 minutos según la intensidad del esfuerzo.

Toma o consumo de oxígeno

La toma o consumo de oxígeno se eleva rápidamente durante los 2-4 primeros minutos para horizontalizarse después. La recuperación es rápida, alcanzándose los valores de partida en 2 ó 3 minutos.

El aumento de la toma de oxígeno se hace con un cierto retraso en relación al inicio de la prueba puesto que una parte de los fenómenos bioquímicos de la contracción muscular se realiza en condiciones de anaerobiosis durante los primeros instantes del ejercicio. El período de equilibrio se alcanza rápidamente, antes que lo hagan los otros parámetros; una vez alcanzado es particularmente constante con tal que el esfuerzo desarrollado no sobrepase las posibilidades del sujeto. *La deuda de oxígeno* contraída durante el período de adaptación no será reembolsada totalmente hasta que el esfuerzo haya acabado, en el curso del período de recuperación.

Eliminación de anhídrido carbónico

Para la eliminación de anhídrido carbónico el equilibrio se alcanza más lentamente que para la toma de oxígeno, siendo el tiempo de adaptación parecido al de la ventilación; ello no sorprende si se tiene en cuenta que la excreción del gas carbónico está directamente ligada a la ventilación. Luego la curva se horizontaliza hasta el fin del esfuerzo. La recuperación es relativamente rápida: aproximadamente idéntica a la de la ventilación minuto, y los valores de base se alcanzan en cuatro o cinco minutos.

Para una potencia o carga de ejercicio dada, en valores absolutos, la ventilación, la eliminación de anhídrido carbónico (por el hecho de estar este parámetro en íntima dependencia de la ventilación) el cociente respiratorio (relación entre la excreción de anhídrido carbónico y el consumo o toma de oxígeno, oscila entre 0,8 y 1 y traduce las combustiones celulares), y el equivalente respiratorio para el oxígeno (relación entre la ventilación y el consumo de oxígeno; su valor normal oscila alrededor de 25) se elevan con la edad y disminuyen con el entrenamiento. En cambio, el consumo o toma de oxígeno prácticamente no es influido por estos dos factores, puesto que el volumen de oxígeno consumido en el curso de un trabajo realizado en estado de equilibrio es directamente proporcional a la intensidad de las combustiones celulares y por consiguiente depende muy poco de la edad y del grado de entrenamiento.

Si el trabajo es superior a las posibilidades del sujeto, la ventilación minuto se eleva rápi-

da y continuamente, primero por aumento de su amplitud, y cuando ello no basta, de su frecuencia: no aparece régimen estable mientras que la toma de oxígeno parece estabilizarse: el equivalente respiratorio para el oxígeno está, en consecuencia, muy aumentado. Si se prosigue el ejercicio aparece una sensación de agotamiento entre el octavo y duodécimo minuto, precediendo en poco el fin de la prueba, que coincide con sensaciones vertiginosas y a veces tendencia sincopal; la taquicardia es considerable. Una vez acabado el ejercicio, la ventilación minuto se mantiene elevada, aunque en grado menor al observado en el último minuto del esfuerzo, para alcanzar la normalidad muy lentamente. Una segunda eventualidad es la elevación lenta y continuada de la ventilación con estabilización de la toma de oxígeno. La potencia de trabajo pedida se mantiene con dificultad. Bruscamente la molestia respiratoria deviene intensa y el débito ventilatorio se eleva muy rápidamente: existe fatiga intensa y sensación de agotamiento sin tendencia sincopal. El período de recuperación es netamente prolongado. La primera eventualidad se observa cuando la carga es francamente superior al trabajo bien tolerado mientras que la segunda corresponde a un trabajo levemente superior al que el sujeto puede desarrollar en régimen estable.

En estos casos la ventilación minuto aún permanece por debajo de la ventilación máxima del sujeto considerado. *La intensidad del ejercicio no parece, pues, limitada por la ventilación.* Hemos dicho que la toma o consumo de oxígeno no se eleva más allá de un cierto límite; esta toma de oxígeno máxima dependen en gran parte del *débito cardíaco*. Así pues, *será éste quien limite, más a menudo que la ventilación las posibilidades de trabajo.* Ya en el campo de la patología, la mediocridad de la ventilación alveolar o anomalías de la permeabilidad de la membrana alveolo-capilar pueden ser los factores determinantes.

La función respiratoria es tan compleja que su estudio no podría limitarse a estos valores fácilmente medibles. Para una mejor comprensión de los mecanismos íntimos de adaptación al esfuerzo hemos de referirnos a otros parámetros cuyo estudio aún no ha entrado en la práctica clínica.

Mecánica ventilatoria

Las resistencias del sistema tóraco-pulmonar al débito aéreo son de dos órdenes: elásticas y dinámicas. Las primeras dependen de las propiedades elásticas del pulmón; las segundas co-

rresponden a las resistencias que oponen las vías aéreas al débito gaseoso y los tejidos a desplazarse. Parece que en el curso del esfuerzo las resistencias elásticas permanecen prácticamente inmodificadas mientras que las resistencias dinámicas, que son función de la ventilación, aumentan regularmente con éste y, por tanto, con la potencia ejecutada.

Para asegurar los cambios de volumen implicados por la ventilación, la musculatura tóraco-diafragmática gasta energía y produce un cierto trabajo mecánico. El *trabajo ventilatorio* es igual a la suma de los productos instantáneos del volumen desplazado por la presión ejercida sobre dicho volumen.

Durante la inspiración, el trabajo ventilatorio puede descomponerse esquemáticamente en dos grupos:

— trabajo elástico, preciso para vencer las fuerzas elásticas de retracción pulmonar, de expansión o retracción de la caja torácica y de la compresión abdominal;

— trabajo dinámico debido a la pérdida de energía durante los movimientos respiratorios a nivel de las diversas resistencias: las viscosas y turbulentas engendradas por el débito aéreo en las vías respiratorias, las ligadas a los roces viscosos de las estructuras pleuro-pulmonares y tóraco-abdominales durante su desplazamiento y las debidas a la inercia que se opone a las aceleraciones y desaceleraciones sucesivas.

Si la respiración es pasiva, el trabajo respiratorio se efectúa gracias a la energía elástica acumulada a la inspiración por lo cual el gasto total de energía es el del solo trabajo inspiratorio.

Cuando es activa, el trabajo respiratorio necesita no sólo la restitución completa de la energía elástica almacenada durante la inspiración, sino también la intervención de una fuerza activa suplementaria proporcionada activamente por los músculos espiratorios. El nivel de ventilación a partir del cual aparece una espiración activa varía con el estado de las funciones ventilatorias del individuo y las condiciones del ejercicio. En el adulto sano medio, durante un ejercicio muscular en bicicleta, se manifiesta a partir de una ventilación minuto vecina de los 30 litros.

El trabajo ventilatorio se hace progresivamente más costoso a medida que la ventilación aumenta. En el individuo sano este aumento es muy moderado: el trabajo ventilatorio es de alrededor 0,05 kgm. por litro de aire ventilado para una ventilación de 25 l/minuto y alcanza 0,25 kgm/l para una ventilación de 100 l/minuto. En el insuficiente respiratorio el trabajo ventilatorio está aumentado en relación al sano

y esta diferencia se acentúa francamente durante el ejercicio muscular, a medida que crece al nivel de ventilación.

A medida que el trabajo ventilatorio aumenta, aumenta también el gasto energético de cada litro de aire ventilado, de manera que cada litro de aire aporta a los tejidos una cantidad de oxígeno cada vez más escasa. En un momento dado, la cantidad de oxígeno aportada por un litro de aire es menor que la cantidad de oxígeno gastada para ventilarlo debido al gran trabajo ventilatorio que se precisa: todo nuevo aumento de la ventilación acarrea una hipoxia y asistimos a una autolimitación energética de la ventilación.

Difusión

La difusión de los gases respiratorios a nivel de la membrana alvéolo-capilar depende de múltiples factores: además de la calidad de la membrana y de su superficie de difusión intervienen los gradientes o diferencias de presión parcial de oxígeno y de gas carbónico entre la sangre venosa mezclada y el aire alveolar y el tiempo de contacto entre la fase gaseosa y la fase líquida.

Sea cual fuere la intensidad del trabajo, el aire alveolar se renueva de manera adecuada para mantener la presión parcial alveolar de anhídrido carbónico dentro de los límites fisiológicos. La presión parcial alveolar de oxígeno aumenta en el curso del esfuerzo, mientras que la sangre venosa mezclada llega a los pulmones fuertemente desaturada y con muy baja presión parcial de oxígeno. En tales condiciones el gradiente de presión entre el oxígeno alveolar y el de la sangre venosa alcanza su punto culminante: parece que es este gradiente alvéolo-venoso el que facilita la difusión del gas por unidad de superficie.

La superficie de hematosis aumenta con el esfuerzo por apertura de nuevos territorios alveolares y capilares y por aumento del calibre de los capilares ya funcionales en reposo.

En cuanto a la capacidad de difusión medida por el monóxido de carbono, aumenta rápidamente del estado de reposo al esfuerzo moderado para tender hacia una meseta cuando el sujeto pasa de un esfuerzo intenso a uno máximo. Esta curva demuestra que la capacidad de difusión es cercana a la máxima en el curso del esfuerzo intenso y permite pensar que a medida que la ventilación y la circulación pulmonar aumentan en el curso del esfuerzo máximo, la zona de intercambios gas-sangre en el pulmón tiende hacia una superficie máxima. El aumento de la capacidad de difusión no es

proporcional al de la ventilación minuto en el curso del esfuerzo progresivo.

En conclusión, se puede decir que en una persona normal el esfuerzo físico, por intenso que sea, no es limitado por los pulmones puesto que ellos cumplen su misión de oxigenación de la sangre y eliminación de anhídrido carbónico.

Circulación pulmonar

La circulación pulmonar se caracteriza esencialmente por su débil presión y por el gradiente tensional relativamente bajo que la anima. Su débito puede variar en proporciones notables sin que se registre un aumento apreciable de la presión, bien sea porque se dilatan los vasos ya irrigados, bien por la puesta en función de vasos sanguíneos anteriormente no funcionales. Por ejemplo, en el sujeto normal en el curso de un ejercicio muscular que justifique un débito sanguíneo triple del de reposo, el aumento de la presión media arterial pulmonar es del orden de 4 mm. Hg.

Durante el esfuerzo, el débito sanguíneo pulmonar aumenta hasta valores muy elevados. Como sea que es igual al producto de la frecuencia cardíaca por el volumen sistólico, se plantea el problema de saber si varía por la modificación de ambos componentes o por la de uno de ellos: parece que el volumen sistólico no puede experimentar variaciones lo suficientemente importantes para aumentar el débito sanguíneo pulmonar y que el papel preponderante corresponde a la frecuencia.

Estando el lecho vascular pulmonar expuesto por su situación y características a las variaciones de presión intratorácicas, éstas repercuten sobre la presión arterial pulmonar.

Gases en sangre arterial y equilibrio ácido-base

Todos estos mecanismos tan numerosos y complejos a los que acabamos de pasar revista concurren a un único fin: mantener la constancia del medio interno.

En el curso del esfuerzo la saturación oxihemoglobínica de la sangre arterial varía poco. Durante los primeros minutos de adaptación puede registrarse una caída de la saturación que se recupera pronto puesto que en el período de equilibrio es igual o superior a la registrada en reposo.

Un trabajo de intensidad mediana y bien soportado determina variaciones moderadas del CO_2 total, del pH y de la presión parcial arterial de anhídrido carbónico. En los primeros

minutos del ejercicio puede constatarse una discreta acidosis de tipo metabólico, es decir, un descenso del pH y del CO₂ total sin modificación significativa de la presión parcial arterial de anhídrido carbónico, debido al acúmulo de metabolitos ácidos. En los minutos subsiguientes los valores vuelven sensiblemente a los de antes del esfuerzo. Si el trabajo realizado se aproxima al máximo capaz de ser soportado en régimen estable, la acidosis metabólica es progresivamente creciente mientras la presión parcial arterial de CO₂ permanece estable. Si el esfuerzo es aún más intenso, el grado de acidosis metabólica desencadena una hiperventilación alveolar que hace decrecer la presión parcial arterial de anhídrido carbónico (alcalosis respiratoria compensadora). Cuando el trabajo sobrepasa ampliamente las posibilidades de la persona, se instaura una hipocapnia marcada.

POTENCIA MAXIMA SOPORTADA

La multiplicación en un mismo sujeto de las pruebas a carga constante progresivamente creciente ha llevado a la escuela de Nancy a definir la *potencia máxima soportada o tolerada* (P.M.S.) como la mayor carga para la que se observa aún un régimen estable en un ejercicio de 20 minutos mientras que para una potencia superior en 20 watts éste ya no existe. Esta P.M.S. varía ampliamente de un sujeto a otro y en una misma persona sufre variaciones menos acusadas debidas al estado físico o al grado de entrenamiento.

El esquema de evolución de los parámetros respiratorios en este tipo de pruebas difiere poco del descrito. Simplemente, son más elevados en valor absoluto y la pendiente de la meseta de la ventilación es más acusada.

La P.M.S. varía según la edad y el sexo. Las personas de edad y las mujeres tienen una peor tolerancia al esfuerzo; se hallan en preferencia entre los grupos relativamente menos aptos para el ejercicio físico.

En personas sanas, *los volúmenes y débitos ventilatorios* (Capacidad Vital, Volumen Residual, Volumen Espiratorio Máximo por segundo, Ventilación Máxima minuto) *tienen poca influencia sobre la P.M.S.* Todo lo más se ha podido observar que las personas más aptas para el trabajo muscular (P.M.S. comprendida entre 200 y 240 watts) tienen una Capacidad Vital por encima de los 5 litros.

Por el contrario, la *morfología* y sobre todo el *entrenamiento físico* *tienen una influencia franca.* La obesidad y aún la simple tendencia a ella infunden incontestablemente reduciendo

la P.M.S. Las personas con un entrenamiento deportivo o profesional intenso son las más capacitadas para realizar los esfuerzos más duros.

VARIACION DE LOS PARAMETROS RESPIRATORIOS EN FUNCION DE LA CARGA

En el curso del período de equilibrio, la frecuencia ventilatoria y el volumen corriente crecen linealmente con la carga. La *ventilación minuto*, producto de estas dos constantes, matemáticamente sólo puede ser una función curvilínea de la potencia desarrollada, siendo más rápido el aumento cuanto mayor sea la carga. La importancia de la ventilación durante el período de equilibrio es función de la intensidad del trabajo y, en menor grado, de su naturaleza. Además, para una potencia o carga dada, la *ventilación minuto es tanto más elevada* cuanto menor sea la P.M.S., es decir, *cuanto menor sea la capacidad de trabajo.*

En lo que concierne a la *toma o consumo de oxígeno* la evolución es muy diferente a la de la ventilación. El volumen de oxígeno consumido en el régimen estable mide directamente las combustiones celulares que presumiblemente son función lineal del trabajo exterior, siempre que las condiciones de rendimiento sean idénticas. Así, pues, *la toma de oxígeno es directamente proporcional a la intensidad del esfuerzo*, independientemente de la constitución del sujeto, de su edad y del grado de entrenamiento. Se puede decir que el consumo de oxígeno aumenta en 150 ml. cada vez que la potencia aumenta en 20 watts, variando las cifras medias de 250 ml. para un trabajo nulo a 3.250 ml. para un trabajo muy intenso de 240 watts.

Para un nivel de esfuerzo dado, el consumo de oxígeno es en valor absoluto más elevado para aquellas personas que han alcanzado su P.M.S.

Para cada nivel de trabajo, sin embargo, existen algunas variaciones dependientes de la aptitud del sujeto para el trabajo muscular. Sucede como si las personas más aptas realizasen un trabajo relativamente más económico y como si su rendimiento fuese mejor. En la explicación de este hecho intervendrían dos mecanismos. Por un lado ASTRAND puso de manifiesto que el «coste del trabajo ventilatorio» representa un porcentaje creciente del metabolismo general cuando el trabajo aumenta; no sería extraño que una persona entrenada efectuase un trabajo ventilatorio menor y por este hecho consumiese menos oxígeno. Por otro lado se ha invocado por DURING una mejoría de la coordinación motora debida al entrenamiento; po-

dría suceder que por el hecho de un mayor hábito para el trabajo físico se utilizasen mejor los grupos musculares, evitándose el derroche de energía en movimientos inútiles.

La evolución de la *eliminación de anhídrido carbónico*, como la de la toma de oxígeno, es función lineal de la potencia. Por lo tanto, también su representación gráfica puede asimilarse a una recta aunque de pendiente ligeramente más acusada. Ello comporta una elevación del cociente respiratorio en función de la carga. Aquí también como para el consumo de oxígeno, los grupos físicamente más aptos se caracterizan por una eliminación de anhídrido carbónico relativamente menor que los grupos menos aptos a igualdad de trabajo.

El *cociente respiratorio* crece de manera ligeramente curvilínea con la potencia. La carga para la cual el cociente respiratorio se acerca más a la unidad es tanto más baja cuanto peores sean las condiciones físicas del sujeto. Ello verifica la acción clásica de que un cociente respiratorio igual a la unidad corresponde al me-

tabolismo de los glúcidos cuya combustión es proporcionalmente mayor cuanto más importante sea el esfuerzo realizado. El cociente es superior a la unidad siempre que el ejercicio no pueda realizarse en estado de equilibrio.

El *equivalente respiratorio para el oxígeno* se eleva también en función de la carga. Aumenta rápidamente hasta valores vecinos de 30 en las personas menos aptas físicamente. En los individuos mejor entrenados aumenta más lentamente y hasta valores menos elevados (24 - 25). En los muy entrenados llega a disminuir en las potencias de esfuerzo menores como si se estableciese una ventilación de lujo, superior a la necesaria para aportar oxígeno a los alveolos; en los ejercicios más intensos o no aumenta o lo hace muy ligeramente.

De lo dicho podemos concluir que la ventilación minuto y el equivalente respiratorio para el oxígeno son los mejores tests de tolerancia al ejercicio muscular: ellos permiten prever si, para un nivel de trabajo o esfuerzo dado, la persona se encuentra cerca o lejos de su P.M.S.