

Monograph

Trabajo Muscular Intermitente

Irma Astrand, Per-Olof Astrand, Erik Hohwü Christensen y Rune Hedman

Department of Physiology, Kungl. Gymnastika Centralinstitutet, Stockolm Ö, Suecia.

RESUMEN

En el presente trabajo fue estudiado el efecto fisiológico de los períodos de recuperación sobre el trabajo en estado no estable [(2160 kpm.min⁻¹), 1 kpm.min⁻¹=0,163 W]. Un sujeto físicamente bien entrenado realizó en una bicicleta ergométrica una cantidad total de 64800 kpm (1 kp=9,8 N, 1 kpm=9,8 J), realizando un trabajo intermitente con períodos de trabajo y pausa de 0,5, 1, 2 o 3 min. Fueron determinados la captación total de O₂, la ventilación pulmonar total, el número total de latidos cardiacos y la concentración de ácido láctico sanguíneo durante la hora de trabajo y durante la recuperación. Fue encontrado que cuando el trabajo intenso fue partido en períodos cortos de trabajo y pausa (0,5 o 1 min de duración), se transformó en una carga submáxima sobre la circulación y la respiración y fue bien tolerado durante una hora. Con períodos más prolongados (de 2 o 3 min de duración), la producción de trabajo alcanzó el límite superior de rendimiento y solo pudo ser realizado con un estrés extremo. Estos hallazgos son discutidos desde un punto de vista fisiológico y práctico. Con el objetivo de explicar los bajos valores de ácido láctico durante períodos cortos de trabajos y recuperación, fue propuesto que la mioglobina tiene una función importante como reserva de oxígeno durante los períodos cortos de trabajo muscular intenso.

Palabras Clave: oxígeno, esprint, producción de potencia

INTRODUCCION

Es bien conocido el hecho que el consumo de oxígeno durante el período inicial de trabajo intenso no se corresponde con la demanda energética; debido a un retraso de tiempo en la respiración y circulación, se produce un cierto déficit de oxígeno. Toma uno o varios minutos, dependiendo de la carga de trabajo y de la aptitud física del individuo, antes de que el consumo de oxígeno alcance un nivel en estado estable. En el trabajo intenso, nunca va a ser alcanzado un estado estable, y el tiempo de trabajo va a estar limitado por metabolitos anaeróbicos en los músculos, sangre y otros tejidos.

El problema del presente trabajo de investigación fue analizar el efecto de las pausas sobre diferentes funciones fisiológicas responsables del incremento del metabolismo durante tal trabajo en estado no estable (2160 kpm.min⁻¹ o 350 W).

En estos experimentos, los períodos de trabajo y las pausas variaron entre 0,5 y 3 min. Durante el mismo experimento, los períodos de trabajo y pausa fueron constantes y de la misma duración. El tiempo total de trabajo fue de una hora y consecuentemente el tiempo de trabajo efectivo y el tiempo de recuperación fueron siempre de 30 min. Durante la hora, el trabajo total alcanzó 64800 kmp, o un promedio de 1080 kpm.min⁻¹. De este modo, fue posible comparar el efecto fisiológico del trabajo intermitente de 2160 kpm.min⁻¹ y el trabajo continuo de 1080 kpm.min⁻¹.

El sujeto entrenado podía realizar ejercicio a la última intensidad durante horas sin que se alcance la fatiga.

Si los períodos de trabajo y pausa son de 0,5 min, van a ocurrir 60 períodos de trabajo iniciales con todas las consecuencias que esto puede tener sobre el consumo de O₂, frecuencia cardiaca, ventilación pulmonar, y así sucesivamente; si los períodos tienen una duración de 3 min, el número de períodos iniciales va a ser solo de 10, y las

diferentes funciones fisiológicas responsables del transporte de O_2 pueden, hacia el final del período de trabajo, alcanzar valores que están bastante cerca de la demanda.

Consecuentemente, uno podría esperar encontrar una reducción de la tendencia del metabolismo anaeróbico en los experimentos con períodos de 3 min en comparación a períodos más cortos, en los cuales el transporte de oxígeno durante el trabajo siempre va a ser menor a la demanda. Sin embargo, los siguientes experimentos dan el resultado opuesto.

MÉTODOS

Todos los experimentos fueron realizados con un sujeto físicamente bien entrenado. R. H., tenía una edad de 25 años, un peso de 74 kg y una talla de 177 cm. Su capacidad para el consumo de oxígeno en 6 minutos de trabajo sobre la bicicleta ergométrica fue de $4,6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ o $62 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. El tenía un pulso promedio de 49 latidos por minuto y su consumo de O_2 basal fue de $0,26 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

El trabajo fue realizado en una bicicleta ergométrica Krogh a 60 revoluciones por minuto con una carga de 6 kg, correspondiente a $2160 \text{ kpm}\cdot\text{min}^{-1}$; en el experimento con trabajo continuo durante una hora, la carga fue de 3 kg y la carga de trabajo fue de $1080 \text{ kpm}\cdot\text{min}^{-1}$. El aire espirado fue recolectado en bolsas de Douglas y analizado de acuerdo a la técnica de Haldane. La frecuencia cardiaca fue registrada con un contador de pulso electrocardiográfico durante la hora de trabajo y durante los 60 min de recuperación después del trabajo. Los valores de reposo para la frecuencia cardiaca y el consumo de O_2 , y los valores de recuperación fueron tomados con el sujeto reclinado en una cama que estaba cerca de la bicicleta. Las determinaciones realizadas durante el trabajo y la pausa se registraron con el sujeto sentado en la bicicleta. Las muestras sanguíneas para la determinación del ácido láctico fueron tomadas de la punta del dedo calentado y los análisis fueron realizados de acuerdo a Barrer y Summerson (1941) con la modificación de Ström (1949). La temperatura rectal fue determinada antes e inmediatamente después del trabajo, y el sujeto fue pesado ($\pm 50 \text{ g}$) para obtener información acerca de la regulación térmica.

RESULTADOS

Algunas de las funciones investigadas son presentadas en la Tabla 1 para hacer posible la comparación entre diferentes formas de trabajo. El número de experimentos fue limitado, lo cual fue motivado en parte por la alta exactitud de los métodos usados y por las demandas extremas que una forma de trabajo de 2 o 3 minutos implica sobre el sujeto, cuando el trabajo debe ser realizado por una hora.

	I		II		III		IV		V		VI	
	Consumo de O ₂ total (L), "trabajo duro", STPD		Consumo de O ₂ total (L), "hora de recuperación", STPD		Eficiencia de trabajo (porcentaje)		Número total de latidos cardiacos durante el "trabajo duro"		Número total de latidos cardiacos durante la "hora de recuperación"		Ventilación pulmonar total (L) durante la "hora de trabajo duro" BTPS	
Trabajo continuo a 1080 kpm.min ⁻¹	145,5		19,9		23,4		7904				2847	
Trabajo continuo a 1080 kpm.min ⁻¹	145,9		19,1		23,4		7859		3683		2916	
Trabajo discontinuo a 2160 kpm.min ⁻¹												
Trabajo (min)	Pausa (min)											
0,5	0,5		154,1	21,8	21,5	8637	4299	3266				
0,5	0,5		154,2	19,6	21,9	8493	4276	3202				
1	1		152,2	21,7	21,6			3330				
1	1		152,4	20,0	21,9	8295	4211	3406				
2	2		160,1	21,0	20,4	8579	4715	3908				
3	3		162,9	24,2	19,4	9215	5219	4355				

Tabla 1. Consumo de O₂ total, eficiencia de trabajo, número total de latidos cardiacos y ventilación pulmonar total durante el trabajo físico continuo y discontinuo.

Sin embargo, fueron realizados más experimentos, aunque solo fueron medidas algunas de las funciones presentadas en la tabla, y estos resultados coinciden con los valores de la misma. Además, debería ser señalado que cada resultado presentado en la Tabla 1 acerca del consumo de O₂ y la ventilación pulmonar durante el trabajo y la recuperación, está basado en un gran número de determinaciones en uno y en el mismo experimento. Por ejemplo, los valores de consumo de O₂ a 1080 kpm.min⁻¹ están basados en un total de 38 determinaciones realizadas entre los minutos 2 y 60 de trabajo. Un promedio de consumo de O₂ de 2,44 L.min⁻¹, con un desvío estándar de 0,038 L.min⁻¹ y un error de la media de 0,006 L.min⁻¹, ilustran la exactitud del método y la estabilidad del sujeto.

	Consumo de oxígeno (L.min ⁻¹) STPD		Ventilación pulmonar (L.min ⁻¹) BTPS		Frecuencia cardiaca (latidos.min ⁻¹)		Ácido láctico			
	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	(mg.100 mL ⁻¹)	mM		
Trabajo continuo a 1080 kpm.min ⁻¹	2,44		49,0		131		12	1,3		
Trabajo continuo durante 9 min a 2160 kpm.min ⁻¹	4,6		124,0		204		150	16,7		
Trabajo discontinuo a 2160 kpm.min ⁻¹										
Trabajo (min)	Pausa (min)									
0,5	0,5		2,90	2,30	62,5	44,5	150	137	20	2,2
1	1		2,93	2,23	65,3	47,5	167	99	45	5,0
2	2		4,40	1,00	95,0	35,0	178	106	95	10,4
3	3		4,60	1,00	107,0	36,0	188	118	120	13,2

Tabla 2. Valores máximos y mínimos de consumo de O₂, ventilación pulmonar, frecuencia cardiaca, y concentración de ácido láctico durante el trabajo continuo y discontinuo.

A partir de la Tabla 1, se puede apreciar que la eficiencia mecánica es mayor (23,4 por ciento) en el trabajo continuo a 1080 kpm.min⁻¹; en el trabajo discontinuo con períodos de 0,5 y 1 min, la eficiencia mecánica es de 21,7 por ciento, con un período de 2 min, 20,4 por ciento y en un período de 3 min, 19,4 por ciento. La disminución moderada de la eficiencia en los períodos cortos en comparación con los períodos de 2 y 3 min también es ilustrada por la diferencia en el número total

de latidos cardíacos (IV y V). La suma del pulso se incrementó desde aproximadamente 11500 en el trabajo continuo hasta aproximadamente 12500 con los períodos de 1 min y hasta aproximadamente 14400 con los períodos de 3 min. La ventilación pulmonar total (VI) mostró la misma tendencia; se incrementó desde 2880 L durante la hora de trabajo continuo hasta 3370 L en el trabajo con períodos de 1 min y hasta 4350 L con los períodos de 3 min, lo cual significa un incremento de 17 y 51 por ciento, respectivamente. Respecto a la regulación del calor, el trabajo con períodos de 3 min parece diferir de los otros, con un incremento en la temperatura rectal de 2,0°C (38,9°C). En los otros casos, la temperatura rectal estuvo cerca de 38°C después del trabajo, con un incremento máximo de 1,35°C. La pérdida de peso fue más o menos idéntica para las diferentes formas de trabajo y alcanzó aproximadamente 700 g.

El trabajo con períodos cortos fue percibido subjetivamente como relativamente suave, y el sujeto no experimentó fatiga después de una hora. El trabajo en los períodos de 2 min y especialmente el de 3 min, implicó una carga cercana al máximo o máxima. Este trabajo pudo ser realizado durante una hora completa solo con una fuerte motivación. Un análisis más cuidadoso de los valores de la Tabla 2, la cual contiene los valores máximos y mínimos de consumo de oxígeno, ventilación pulmonar y frecuencia cardíaca para el trabajo intermitente, proporciona una explicación para esta diferencia en la fatiga subjetiva.

Los valores para el trabajo continuo a 1080 y 2160 kmp.min⁻¹, respectivamente, también son incluidos en la Tabla 2, para fines de comparación. Los valores máximos se refieren a las determinaciones realizadas durante el último medio minuto del período de trabajo. Del mismo modo, los valores mínimos se refieren al último medio minuto del período de recuperación. Debería ser señalado que debido a la técnica usada para la recolección del aire espirado durante 0,5 min, los datos presentados no representan los valores absolutos máximos y mínimos; esto puede tener un cierto significado en los períodos de 0,5 y 1 min. Teniendo en cuenta que los mayores valores de consumo de oxígeno y frecuencia cardíaca son alcanzados por primera vez 15 a 20 min después del comienzo de la hora de trabajo, los valores presentados en la Tabla 2 son representativos de la última parte del período de trabajo y no para los primeros 5 o 10 min. Los valores de ácido láctico son válidos para el período inmediatamente después del final de la hora de trabajo, pero generalmente la concentración sanguínea de ácido láctico alcanzó un nivel más o menos constante aproximadamente 15 a 20 min después del inicio de la hora de ejercicio; consecuentemente no se observó una acumulación continua de ácido láctico.

Los resultados más sorprendentes que fueron obtenidos fueron los bajos valores de ácido láctico, aproximadamente 20 mg.100 mL⁻¹ (2,2 mM), en el trabajo con períodos cortos. De acuerdo a las consideraciones introductorias, se esperaba que esta forma de trabajo resultara en condiciones relativamente desfavorables para el aporte de oxígeno a los músculos activos. Los bajos valores de ácido láctico que fueron encontrados, contradicen esta afirmación.

DISCUSION

Los resultados anteriormente presentados son de interés por diferentes razones. Los mismos confirman los hallazgos reportados en otros trabajos por Christensen, Hedman y Holmdahl (1960), que indican que la eficiencia mecánica en el trabajo intermitente, con la carga y duración de los períodos de trabajo y pausa, apropiados, no presenta un nivel considerablemente menor que el del trabajo continuo.

El hecho que uno puede obtener una mayor cantidad de trabajo realizado a una carga extremadamente intensa con una carga claramente submáxima sobre la circulación y respiración, por medio de la aplicación apropiada de cortos períodos de trabajo y pausa, es de gran interés práctico y fisiológico.

Los resultados ilustran que uno puede dividir la cantidad total de trabajo en períodos apropiados, de un modo tal que uno puede inducir el entrenamiento de grandes grupos musculares sin una carga simultánea sobre los órganos respiratorios y circulatorios (trabajo con períodos más cortos a través de un tiempo prolongado). Eligiendo períodos más largos, por ejemplo, 2 a 3 min, uno puede obtener un gran efecto de entrenamiento también sobre la respiración y circulación. Esto es de interés no solo para el entrenamiento de deportistas, sino también para la rehabilitación de pacientes durante el período de convalecencia, etc.

La razón por la cual los trabajadores ancianos, a pesar de su baja capacidad de consumo de oxígeno en un grado sorprendentemente alto, continúan realizando trabajos físicamente duros, tales como la silvicultura y la agricultura, también puede ser explicada. Si estos trabajadores, espontáneamente eligen una duración apropiada de los períodos de trabajo y pausa, las cargas agudas sobre la respiración y la circulación no necesitan exceder el intervalo moderado correspondiente a la reducida capacidad del individuo anciano. Si, sin embargo, la intensidad de trabajo es impuesta por una máquina, aun un trabajo menos intenso con períodos de trabajo relativamente prolongados puede implicar la

eliminación de los trabajadores ancianos.

En la presente investigación, los períodos de trabajo y pausa fueron siempre de la misma duración en el mismo experimento. De este modo, es difícil decidir si los períodos de trabajo o las pausas, de corta duración, causan los resultados favorables que fueron obtenidos. Este problema va a ser más profundamente analizado en una investigación futura.

Una relación entre el tiempo de trabajo y pausa de 1:1 parece proporcionar una recuperación prácticamente completa, si la duración del período es de 0,5 min. Por otro lado, este no es para nada el caso si la duración del período es de 2 o 3 min. Es importante destacar el hecho que la concesión de descanso usada en la industria para evitar la sobrecarga de los trabajadores, basada en un consumo calórico promedio durante el día de trabajo de 8 horas, de acuerdo a nuestros hallazgos puede tener efectos fisiológicos completamente diferentes dependiendo de la duración de los períodos de trabajo y pausa.

Con el objetivo de explicar los bajos valores de ácido láctico en los períodos cortos, pueden ser propuestas dos hipótesis. La primera postula que la tasa de formación de ácido láctico es la misma, independientemente de la duración del período, pero ese ácido láctico durante los períodos de descanso corto es eliminado casi a la misma tasa. De acuerdo a Lehmann (1953, p. 49), muchas pausas cortas deberían implicar una recuperación más favorable que una larga, pero de este modo, menos pausas.

La otra hipótesis asume que la formación de ácido láctico durante los períodos de trabajo corto está reducida al mínimo. Esto significaría que la liberación de energía durante la fase inicial (0,5 min) de trabajo de 2160 kpm.min⁻¹ podría llevarse a cabo aeróbicamente. Esto entra en conflicto con afirmaciones anteriores, pero sin embargo da la explicación más probable para los hallazgos experimentales relacionados aquí. El transporte de oxígeno por la sangre a los músculos durante el trabajo es menor, tanto en términos absolutos como relativos durante los períodos de trabajo corto; si a pesar de esto el trabajo es aeróbico, debe depender de la cantidad de oxígeno de la cual los músculos disponen en el momento en el que se inicia el trabajo.

El oxígeno unido a la mioglobina y la hemoglobina en los músculos y la cantidad que llega a los músculos con la sangre durante los 0,5 min de trabajo debe ser un prerrequisito para este trabajo aeróbico.

Durante las pausas, aun si solo tienen una duración de 0,5 min, la mioglobina debe tener seguramente tiempo para recargarse con oxígeno antes de que comience el siguiente período de ejercicio. Durante los períodos de trabajo de 2 o 3 min, el transporte de oxígeno a los músculos es relativamente mayor, pero nunca se vuelve adecuado, y el oxígeno unido a la mioglobina, el cual alcanza para solo una pequeña parte del período de trabajo total, se vuelve mucho menos importante.

Si esta afirmación es correcta, la mioglobina tiene una función fundamentalmente importante más allá de la tradicionalmente aceptada, i.e., juega un determinado rol como un amortiguador o *buffer* de oxígeno en el músculo, siendo recargada durante la relajación, de modo que puede reducirse durante la siguiente contracción. De acuerdo a los puntos de vista presentados aquí, la mioglobina debería representar una reserva de oxígeno, que es usada durante la fase inicial de trabajo, antes de que la circulación y respiración sean capaces de alcanzar los valores que corresponden a la verdadera demanda de oxígeno. En otra investigación se tendrán en cuenta estos puntos.

REFERENCIAS

1. Barker S. B. and H. Summerson (1941). The colorimetric determination of lactic acid in biological materials. *J. boil. Chem.* 138, 535-554
2. Christensen E. H., R. Hedman and I. Holmdahl (1960). The influence of rest pauses on mechanical efficiency. *Acta physiol. Scand.*, 48, 443-447
3. Lehmann G (1953). *Praktische Arbeitsphysiologie.* Stuttgart, Georg Thieme Verlag, 19
4. Strom G (1949). The influence of anoxia on lactate utilization in man after prolonged muscular work. *Acta physiol. Scand.* 440-451

Cita Original

Astrand Irma, Per-Olof Astrand, Erik Hohwü Christensen, y Rune Hedman. Intermittent Muscular Work. *Acta physiol.*

scand; 48: 448-453, 1960.