

Monograph

Fatiga Muscular Inspiratoria Posterior al Ejercicio de Intensidad Moderada en el Calor

James S Williams^{1,2}, Kendra A O'Keefe¹ y Lee T Ferris²¹Department of Health, Exercise, and Sport Sciences.²Department of Physiology, Texas Tech University/TTU Health Sciences Center, Lubbock, TX, USA.

RESUMEN

Se ha demostrado que el ejercicio intenso produce reducciones en la fuerza muscular inspiratoria en sujetos saludables. El propósito del presente estudio fue determinar los efectos combinados del ejercicio de resistencia de moderada intensidad y de la carga térmica sobre la fuerza muscular inspiratoria en sujetos activos. Ocho sujetos femeninos activos, no aclimatados al calor (23.5 ± 1.4 años; $VO_2\text{máx} = 39.8 \pm 2.4$ mL/kg/min) realizaron en forma aleatoria dos ejercicios de resistencia de 40 min. (60% $VO_2\text{máx}$) en un ambiente de temperatura neutra ($22^\circ\text{C}/21\%$ RH) o caluroso ($37^\circ\text{C}/33\%$ RH) en días separados. Se realizaron mediciones de la presión inspiratoria máxima sostenida en boca ($P_{\text{Imáx}}$) pre y post ejercicio como un índice de la fuerza muscular inspiratoria. Las variables adicionales obtenidas cada 10 min durante las sesiones de ejercicio de resistencia incluyeron: temperatura rectal (T_{RE}), frecuencia cardíaca (HR), ventilación minuto (VE), consumo de oxígeno (VO_2), volumen corriente (VT), frecuencia respiratoria (Fb), y el índice de esfuerzo percibido y disnea (RPE/RPD). Los datos se analizaron mediante el análisis de varianza ANOVA para medidas repetidas. Los resultados indicaron, que luego del ejercicio en el calor, se produjo una reducción significativa ($p < 0.05$) de la $P_{\text{Imáx}}$ en comparación con los valores observados en reposo y luego del ejercicio en condiciones termoneutrales. La $P_{\text{Imáx}}$ basal y posterior al ejercicio en el ambiente termo- neutro se mantuvo sin alteraciones. La HR y la T_{RE} fueron significativamente más altas ($p < 0.05$) en el ambiente caluroso comparado al ambiente termo-neutro. La VE y el VO_2 no fueron significativamente diferentes entre estas condiciones. El VT se mantuvo inalterado entre las condiciones considerando que la Fb fue más alta ($p < 0.05$) en la condición de ejercicio en el calor comparada a la condición de ejercicio en condiciones termoneutrales. El RPE no fue significativamente diferente entre las condiciones. El RPD fue significativamente más alto ($p < 0.05$) con el ejercicio en condiciones de calor comparado con la condición de ejercicio en ambiente termoneutral. En vista de estos resultados, concluimos que el ejercicio de resistencia de moderada intensidad (60% $VO_2\text{máx}$) en un ambiente caluroso produce reducciones significantes en la fuerza muscular inspiratoria en mujeres con una pobre aptitud física. La diferencia de este hallazgo con el de los estudios previos es que, aquellos que llevados a cabo utilizando protocolos de ejercicio en ambientes termoneutrales han mostrado que se requiere de una intensidad de ejercicio del 80% del $VO_2\text{máx}$ para producir reducciones en la fuerza muscular inspiratoria. Además, la percepción de la disnea durante el ejercicio es mayor en un ambiente caluroso, comparado al de temperatura neutra, a un nivel similar de VE y VO_2 .

Palabras Clave: control respiratorio, resistencia, función respiratoria, carga térmica

INTRODUCCION

En estudios previos se ha demostrado que el ejercicio máximo o casi máximo provoca la fatiga muscular inspiratoria (IMF) posterior al ejercicio tanto en sujetos entrenados como desentrenados (Babcock et al., 1995a; 1995b; Coast et al., 1999; Johnson et al., 1996; Mador et al., 1993). En general, parece que la intensidad del ejercicio debe ser muy alta ($>80\% \text{VO}_2\text{máx}$) y la duración del ejercicio debe ser de al menos 10 min como para producir IMF en sujetos varones y mujeres en un amplio rango de niveles de aptitud física (Babcock et al., 1996; 2002; Johnson et al., 1996). Nosotros hemos mostrado recientemente que la IMF ocurre tanto en hombres como mujeres desentrenados, a una intensidad del ejercicio $> 80\% \text{VO}_2\text{máx}$ y que la magnitud de la disminución en la fuerza muscular inspiratoria es similar en ambos sexos (Gonzales et al., 2003). Asimismo, en general se acepta que el sistema pulmonar no limita el rendimiento durante la realización de ejercicio submáximo prolongado en sujetos saludables (Powers y Howley, 2004). Sin embargo, datos limitados sugieren que la función muscular inspiratoria puede verse comprometida durante el ejercicio submáximo realizado en diferentes condiciones ambientales (e.g., calor o altitud) (Cibella et al., 1996; Romer et al., 2004).

Se han sugerido diversas hipótesis relacionadas con las posibles causas de la IMF posterior al ejercicio intenso. Estas incluyen la acumulación de metabolitos inducida por el ejercicio en el diafragma (Babcock et al., 1995a; Yanos et al., 1993), reducciones en los sustratos energéticos disponibles (Ianuzzo et al., 1987), y la competición por el flujo de sangre entre músculos respiratorios y locomotores (Babcock et al., 1995a; Babcock et al., 1995b; Harms et al., 1997; Johnson et al., 1996). Babcock et al (2002) han sugerido además una causa dual de IMF inducida por el ejercicio. Estos autores sugirieron que el desarrollo de la IMF durante el ejercicio intenso está relacionado con la magnitud tanto del trabajo inspiratorio resistivo como del trabajo inspiratorio elástico, y la adecuación del suministro de sangre. Estos autores además, sugieren que una mayor reducción en el suministro de sangre disponible hacia los músculos que producen la inspiración hará que se requiera de menor trabajo muscular para producir IMF.

El ejercicio en un ambiente caluroso produce alteraciones substanciales en la función cardiovascular con un aumento progresivo en el flujo de sangre cutánea cuando aumenta la temperatura central (Rowell, 1986). Por consiguiente, el flujo de sangre hacia la musculatura inspiratoria puede verse adicionalmente comprometido durante el ejercicio en el calor lo que a su vez podría exacerbar la FMI, incluso a una intensidad moderada de ejercicio. El propósito de este estudio fue evaluar la hipótesis de que la magnitud de la IMF sería mayor luego de la realización de ejercicios de moderada intensidad en ambientes calurosos en comparación con la realización de ejercicios en un ambiente termoneutral. Nuestro interés en evaluar los efectos del ejercicio prolongado de intensidad moderada en un ambiente caluroso estuvo relacionado con que este tipo de ejercicio es característico de una situación de entrenamiento diaria en oposición a una prueba de ejercicio progresivo hasta el agotamiento. Asimismo escogimos estudiar mujeres porque: (1) existen considerablemente pocos datos acerca de la función muscular inspiratoria durante el ejercicio en mujeres (Sheel et al., 2004); (2) estudios previos han demostrado que las mujeres difieren de los hombres con respecto al control ventilatorio (White et al., 1983); y (3) las mujeres difieren de los hombres respecto del costo de oxígeno de la respiración (Topin et al., 2003) el cual puede influir en la función muscular inspiratoria durante el ejercicio.

METODOS

Sujetos

La población del estudio consistió de ocho mujeres (edad 23.5 ± 4.1 años; altura 1.66 ± 0.07 m; peso 59.2 ± 5.6 kg; media \pm DE) quienes eran físicamente activas pero no participaban en deportes competitivos. En base a un cuestionario de historia médica detallada se determinó que todos los sujetos estaban libres de enfermedades cardiopulmonares, metabólicas o músculo esqueléticas y eran no fumadores. Todos los sujetos firmaron un formulario de consentimiento informado y el estudio fue aprobado por el Comité de Revisión Institucional de la Universidad.

Procedimientos Generales de Evaluación

Los sujetos se presentaron al laboratorio en cuatro ocasiones separadas. En la primera visita, los sujetos practicaron un maniobra de presión inspiratoria máxima (10-15 pruebas) (Larson et al., 1993) y se familiarizaron con el equipo para la evaluación del ejercicio. La presión inspiratoria máxima (P_Imax) normalmente se ha usado como un índice de fatiga muscular inspiratoria (Chen et al., 1989; Inbar et al., 2000; Romer et al., 2002a; Sonetti et al., 2001; Volianitis et al., 2001; Williams et al., 2002). Aunque esta técnica de medida no proporciona información acerca del sitio específico de fatiga (central vs periférica) o acerca de los músculos inspiratorios específicos involucrados, es suficiente para determinar la generación de fuerza muscular inspiratoria global. La segunda visita al laboratorio consistió en una exploración selectiva espirométrica para examinar la función pulmonar normal y de la realización de un test de ejercicio progresivo máximo (GXT). En las últimas dos visitas, los sujetos realizaron una prueba de ejercicio de resistencia (EET) tanto en un ambiente termoneutral como en un ambiente caluroso. Las sesiones de evaluación en donde se llevaron a cabo el GXT y la EET estuvieron separadas por 48 horas y el orden de las condiciones ambientales para la prueba EET fue aleatorio. Toda las pruebas fueron llevadas a cabo durante la fase folicular del ciclo menstrual (6-14 días siguientes a la menstruación) y a la misma hora del día. Se les pidió a los sujetos que no ingirieran café u otras bebidas con contenido de cafeína en los días de las pruebas y que se abstuvieran de realizar ejercicios vigorosos en las 24 h previas a las evaluaciones.

Test de Ejercicio Progresivo Máximo y Evaluación de la Función Pulmonar

Todos los sujetos realizaron un GXT en un cicloergómetro con cupla electromagnética (Lode, Corival, Groningen, Holland). Luego de un breve período que sirvió como entrada en calor, se comenzó con el test de ejercicio con una carga de 25 W y los sujetos mantuvieron un ritmo de 70 rpm. La carga del ergómetro se aumentó en 25 W cada 2 min hasta que los sujetos fueran incapaces de conservar el ritmo fijo o hasta el agotamiento volitivo. Los datos de los parámetros ventilatorios y del intercambio de gases se obtuvieron por ventilación durante el test GXT y fueron promediados a intervalos de 30 segundos mediante la utilización de un sistema de medición del metabolismo automatizado (MedGraphics, CPX/D, el St. Paul, MN). La frecuencia cardíaca (HR) se monitoreó continuamente a lo largo del GXT mediante el uso de un electrocardiograma (Quinton, Q4000, Bothell, WA). Previo al GXT se llevó a cabo la evaluación de la función pulmonar estándar (Knudson et al., 1983) para determinar la capacidad vital forzada (FVC), el volumen espiratorio forzado en un segundo (FEV₁) y la ventilación voluntaria máxima en 12-segundos (MVV₁₂); utilizando el sistema de medición metabólico/pulmonar previamente descrito. La calibración del sistema de medición del metabolismo se llevó a cabo antes de cada sesión de evaluación de acuerdo con las especificaciones del fabricante. El pneumotacógrafo fue calibrado con una jeringa de 3L y los analizadores de gases fueron calibrados con gases certificados de concentración conocida (5% CO₂; 12% O₂)

Prueba de Ejercicio de Resistencia

Todos los sujetos completaron, en días separados, dos pruebas de 40 min de duración en un cicloergómetro y en tanto en condiciones termoneutrales (22°C-21% RH) como en condiciones calurosas (37°C-33% RH). Para la prueba en condiciones de calor se utilizó una cámara ambiental. Las pruebas de resistencia se realizaron en orden aleatorio y se llevaron a cabo con una carga de trabajo correspondiente al 60% del VO₂máx de los sujetos determinados durante el GXT. El consumo de oxígeno (VO₂), la frecuencia cardíaca (HR), la ventilación minuto (VE), el volumen corriente (VT), la frecuencia respiratoria (F_b), el índice de esfuerzo percibido (RPE; escala de Borg 6-20) y la disnea percibida (RPD; escala Borg 0-10) fueron determinados inmediatamente antes y a intervalos de 10 min durante las pruebas de resistencia como tal como se describiera previamente. Además, se supervisó la temperatura rectal (T_{RE}) en forma continua y la misma se registro a intervalos de 10-min durante las pruebas de resistencia con un termistor insertado a una profundidad de 12 centímetros (YSI, Yellow Springs, OH). Se le permitió a los sujetos consumir la bebida deportiva comercial de su preferencia *ad libitum* antes y durante las pruebas de resistencia para prevenir la deshidratación severa. Las mediciones de la FVC y la P_Imáx fueron obtenidas antes e inmediatamente después de las pruebas de resistencia. Como un índice de esfuerzo y motivación general (Coast et al., 1990), se evaluó la fuerza de presión palmar (HG) antes y después de las pruebas de resistencia utilizando un dinamómetro estándar (Takei, Kogyo, Japan). Se permitió la realización de tres intentos con la mano dominantes y se utilizó el mejor valor para los análisis.

Prueba de Fuerza Muscular Inspiratoria

Como un índice de fuerza muscular inspiratoria global, la P_Imax generada en la boca fue registrada comenzando a partir del volumen residual tal como se describiera previamente (Black and Hyatt, 1969). Se registraron las presiones en la boca con un transductor de presión diferencial (Validyne, DP-45, Northridge, CA) que se calibró con un manómetro de presión certificado previo a cada prueba. Una pantalla de computadora proporcionaba retroalimentación visual de las señales de presión. Los sujetos sostuvieron cada esfuerzo inspiratorio por lo menos 1 s. Para garantizar la repetibilidad de los resultados, se realizaron 3-5 pruebas con al menos 1 min de pausa entre cada prueba para prevenir la fatiga inducida por el test. La mayor presión inspiratoria negativa estática registrada (cm H₂O) dentro del 5% de las otras tres pruebas fue utilizada en los análisis estadísticos.

Análisis Estadísticos

Los datos fueron analizados mediante el análisis de varianza ANOVA para medidas repetidas. Los efectos principales significativos fueron analizados con el test post hoc de Student-Newman. Los resultados se presentan como medias (\pm EE). Un valor de $p < 0.05$ fue considerado significativo. Los análisis estadísticos fueron llevados a cabo utilizando el programa SigmaStat para Windows (Jandel Scientific Software, SPSS Inc., Chicago IL)

RESULTADOS

Los resultados del GXT y de la prueba de función pulmonar se presentan en la Tabla 1. Todos los sujetos demostraron esencialmente una función pulmonar normal y respuestas cardiopulmonares normales al ejercicio progresivo. Los valores medios para la P_{Imax} antes y después de la EET para ambas condiciones ambientales se presentan en Figura 1. Los valores basales no fueron significativamente diferentes entre las condiciones ambientales. No se observó ninguna reducción significativa en la P_{Imax} posterior al EET en la condición de temperatura neutral en comparación con los valores basales. Luego de la prueba EET en condiciones de calor se observó una reducción significativa ($p = 0.001$) en la P_{Imax} respecto del valor basal y respecto del valor obtenido luego de la prueba EET en condiciones termoneutrales ($p = 0.003$). Todos los sujetos exhibieron una reducción de la P_{Imax} luego del ejercicio en condiciones de calor. No se observaron diferencias significativas respecto de los valores de FVC o HG antes o después de las pruebas EET en cada condición ambiental.

VO₂máx (mL/kg/min)	39.8 (2.4)
% del VO₂máx estimado	120.6 (9.3)
HRmax	184 (2)
% de la HRmáx estimada	93.2 (1.3)
RER	1.20 (.01)
FVC (L)	4.2 (.2)
% de la FVC estimada	111.8 (4.4)
FEV₁/FVC (%)	83.9 (2.3)
MVV (L/min)	122.0 (5.9)
% de la MVV estimada	106.3 (5.2)

Tabla 1. Test de ejercicio progresivo y valores espirométricos. Los datos son medias (\pm EE)

La T_{RE} y las respuestas de la HR durante las pruebas EET en ambas condiciones ambientales se presentan en Figura 2. Los valores basales para ambas variables no fueron significativamente diferentes entre las condiciones ambientales. Se observaron diferencias significantes ($p = 0.023$) en la T_{RE} entre las condiciones ambientales a los 40-min del período de medición durante la EET. También se hallaron diferencias significativas en la HR entre las condiciones a los 20-min ($p = 0.008$), 30-min ($p = 0.003$), y 40-min ($p = 0.001$) durante los períodos de medición de la EET.

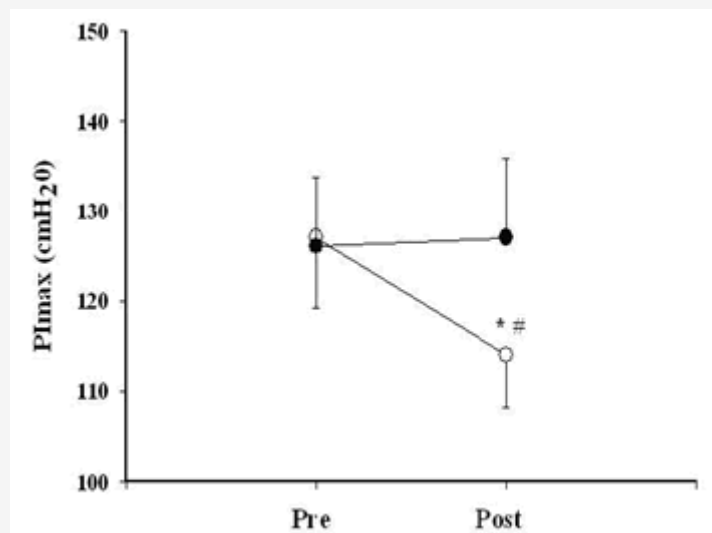


Figura 1. Presión inspiratoria sostenida máxima (PImax) obtenida antes y después de la realización de ejercicio de resistencia con condiciones ambientales termoneutrales (círculos negros) y calurosas (círculos blancos). Los valores son medias \pm EE. # Diferencia significativa respecto del estado basal ($p = 0.001$); * diferencia significativa respecto de la condición termoneutral ($p = 0.003$).

No se hallaron diferencias significativas entre las condiciones en ningún de los puntos de medición respecto de la VE o el VO_2 . Las respuestas del VT y de la Fb durante el EET para ambas condiciones se muestran en la Figura 3. No se observaron diferencias significativas entre las condiciones respecto del VT. La Fb tendió a ser más alta en cada punto de medición durante el ejercicio en condiciones calurosas comparado a la condición termoneutral, observándose una significancia estadística a los 30 min ($p = 0.026$) y a los 40 min ($p = 0.005$) de los períodos medidos.

Los valores del RPE no fueron significativamente diferentes entre las condiciones (Figura 4). La RPD fue significativamente mayor en la condición de calor en comparación con la condición termoneutral, a los 30 min ($p = 0.012$) y a los 40 min ($p = 0.002$).

DISCUSION

El principal hallazgo del presente estudio fue que el ejercicio de resistencia de moderada intensidad (60% $VO_{2m\acute{a}x}$) en un ambiente caluroso causó reducciones significativas en la fuerza muscular inspiratoria en mujeres desentrenadas. En contraste, estudios previos (Babcock et al., 1996; 2002; Johnson et al., 1996) han indicado que se requiere de una intensidad $>80\%$ del $VO_{2m\acute{a}x}$ para provocar una IMF significativa cuando el ejercicio se realiza en condiciones termoneutrales. Además, la percepción de disnea fue mayor cuando se realizaron ejercicios en un ambiente caluroso que cuando se realizaron ejercicios en un ambiente termoneutral a pesar del mismo nivel de VE y VO_2 . Los datos de las mediciones de la fuerza de presión palmar sugieren que la reducción en la fuerza de los músculos inspiratorios no provocó una fatiga generalizada ni resultó en una menor motivación por parte de los sujetos.

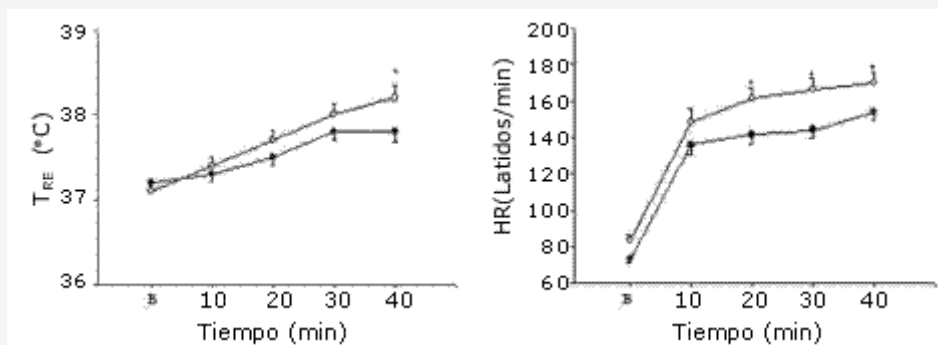


Figura 2. Respuestas de la temperatura rectal (T_{RE}) y de la frecuencia cardiaca (HR) durante las pruebas de resistencia para ambas condiciones ambientales, termoneutral (círculos negros) y calor (círculos blancos). Los valores son medias \pm EE. * Diferencia significativa respecto de la condición termoneutral ($p < 0.01$).

Para nuestro conocimiento, sólo otro estudio ha investigado los efectos combinados de ejercicio de resistencia y carga térmica sobre la IMF. Los resultados de este estudio (Romer et al., 2004) sugieren que el ejercicio de resistencia en condiciones de calor (40 min/ 66% de la máxima carga de trabajo) provocarían la reducción del rendimiento en una subsiguiente prueba de ciclismo contra reloj pero no exacerbaría la IMF en comparación con el ejercicio realizado en ambientes frescos. Aunque no pueden hacerse comparaciones directas entre nuestro estudio y el estudio de Romer et al, ya que sus sujetos eran hombres entrenados en resistencia, el hallazgo de que los músculos que producen la inspiración son susceptibles a la fatiga luego de la realización de ejercicios de resistencia de moderada intensidad en ambientes calurosos, es parcialmente similar a lo observado en nuestro estudio. Si bien nuestros resultados sugieren que hubo diferencias significativas entre las condiciones ambientales, no pudimos detectar la presencia de IMF luego del ejercicio en condiciones termoneutrales. Esta disparidad en los resultados puede deberse a diferencias metodológicas entre los estudios. En el estudio de Romer et al (2004), la fuerza de los músculos inspiratorios fue determinada luego de una prueba de ciclismo contra reloj que fue precedida por un serie de ejercicio con carga constante. Por lo tanto, en este estudio los sujetos debieron realizar un trabajo inspiratorio considerablemente mayor en comparación al realizado por los sujetos de nuestro estudio. Además, la temperatura utilizada en el estudio de Romer et al (2004), fue mayor tanto durante la condición de calor (37°C vs 35°C) como durante la condición termoneutral (22°C vs 15°C) en comparación a las temperaturas utilizadas en nuestro estudio. Este nivel de carga térmica fue adecuado para nuestros sujetos desentrenados ya que resultó en diferencias significativas entre las condiciones ambientales.

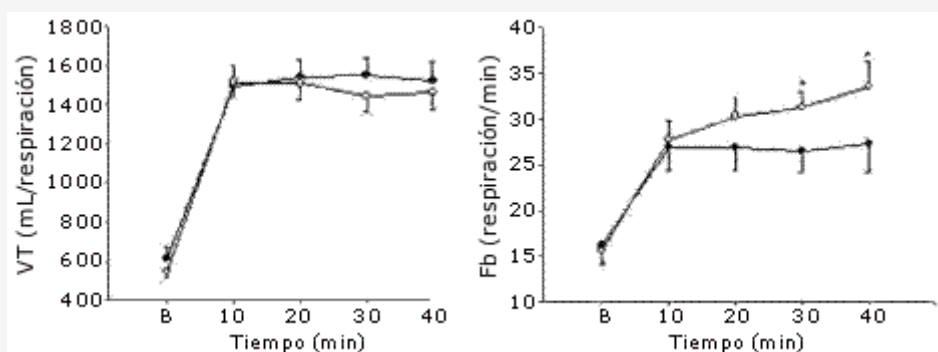


Figura 3. Respuestas del volumen corriente (VT) y de la frecuencia respiratoria (Fb) durante las pruebas de resistencia para ambas condiciones ambientales, termoneutral (círculos negros) y calor (círculos blancos). Los valores son medias \pm EE. * Diferencia significativa respecto de la condición termoneutral ($p < 0.05$).

En las dos condiciones de ejercicio de resistencia utilizadas en nuestro estudio, la intensidad del ejercicio estuvo bien por debajo del umbral previamente informado ($>80\%$ VO_{2max}) para la IMF inducida por el ejercicio (Babcock et al., 1996; 2002; Johnson et al., 1996). No se observaron evidencias de IMF luego del ejercicio en condiciones termoneutrales mientras que se observó una reducción significativa en la fuerza de los músculos inspiratorios luego de la realización de ejercicios en el calor. Harms et al (1997) han demostrado que los músculos locomotores y el diafragma compiten por el

gasto cardíaco durante la realización de ejercicios intensos. Los cambios en el trabajo de los músculos inspiratorios parecen afectar el flujo de sangre hacia las extremidades a través de un arco reflejo simpático originado en los receptores tipo III/IV ubicados en los músculos inspiratorios (St Croix et al., 2000). Con la adición de una carga térmica durante el ejercicio, no está claro que lecho vascular podría verse comprometido ya que una porción adicional del gasto cardíaco estaría siendo dirigido hacia la circulación cutánea para la termorregulación. Aunque indirectamente, nuestros datos sugieren que el flujo sanguíneo hacia los músculos inspiratorios estuvo comprometido durante el ejercicio en el calor por el mayor nivel de IMF en esta condición y en comparación con el ejercicio en condiciones termoneutrales. Estas diferencias fueron observadas a un nivel similar de VE y VO₂ y presumiblemente con un nivel similar de trabajo muscular inspiratorio. Es posible que el arco reflejo mencionado previamente que compromete el flujo sanguíneo hacia las extremidades también comprometa el flujo de sangre hacia los músculos inspiratorios, lo cual puede haber exacerbado la IMF.

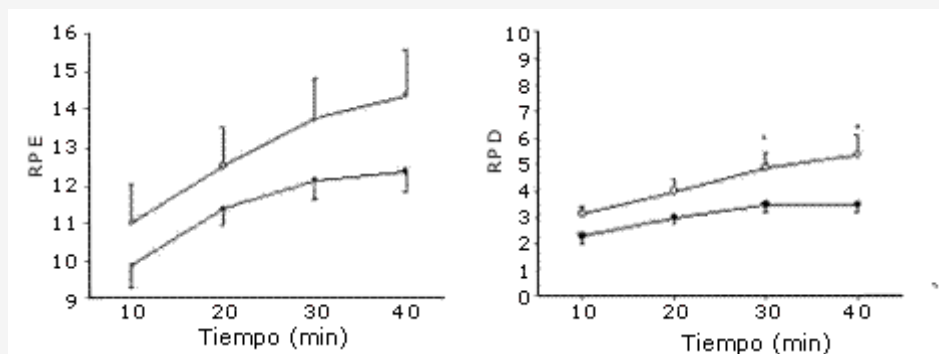


Figura 4. Índice de esfuerzo percibido (RPE) y disnea (RPD) durante las pruebas de resistencia para ambas las condiciones ambientales, termoneutral (círculos negros) y calor (círculos blancos). Los valores son medias \pm EE. * Diferencia significativa respecto de la condición termoneutral ($p < 0.05$).

Las respuestas elevadas de T_{RE} y de HR al ejercicio de moderada intensidad en un ambiente caluroso están bien establecidas, y la magnitud del aumento en el presente estudio es comparable a los valores reportados previamente (Powers et al., 1982; Romer et al., 2004). El incremento en la HR durante la exposición al calor es consecuencia del incremento en el flujo de sangre hacia la piel y de la reducción subsiguiente en el volumen de sangre central lo que deriva en una reducción del volumen sistólico y en un incremento compensatorio en la en la HR. Nuestros valores del VO₂ también son similares a los observados en un estudio previo, en el que se observó un pequeño pero significativo aumento en la respuesta del VO₂ durante la realización de ejercicios de moderada intensidad en un ambiente caluroso (Powers et al., 1982).

El progresivo incremento en la VE se produce en respuesta al ejercicio prolongado con carga constante en un ambiente termoneutral (Martin et al., 1981) y también se ha reportado un incremento en la VE durante la realización de ejercicios en ambientes húmedos y calurosos. Esta "tendencia" ascendente en la VE en ambientes calurosos puede ser el resultado del aumento de la temperatura de la sangre que influye en el control del centro respiratorio (Powers et al., 1982). Las respuestas ventilatorias alteradas en el calor parecen ser resultado de un aumento en la Fb y de una disminución del VT (Martin et al., 1979) y este modelo de taquipnea ha sido observado también después de la inducción de IMF (Mador, 1991). Nuestros resultados concuerdan con estos hallazgos previos en que, la VE se incrementó ligeramente en cada período de medición durante el ejercicio en el calor y en comparación con el ejercicio en condiciones termoneutrales, y en que nuestros sujetos desarrollaron un patrón de taquipnea hacia el final de la prueba EET en condiciones de calor. Esto podría interpretarse como que el incremento significativo en la Fb durante el ejercicio en el calor, con el VT constante, ocurrió en respuesta a un incremento en la IMF (Mador, 1991,; Mador y Acevedo, 1991,; Syabbalo et al., 1994).

Estudios previos han mostrado que la IMF inducida experimentalmente provoca una sensación de esfuerzo respiratorio (Gandevia et al., 1981). Nuestros datos concuerdan con estos hallazgos ya que la RPD estuvo significativamente elevada durante el ejercicio en el calor y en comparación con la condición termoneutral, a un nivel similar de VE y VO₂. Nosotros creemos que la elevación de la RPD esta relacionada con la IMF resultante, lo cual estuvo evidenciado por la reducción en la P_{imax} posterior a la práctica del ejercicio. Además, estudios recientes han demostrado reducciones en la sensación de esfuerzo respiratorio durante el ejercicio luego de un período de entrenamiento muscular inspiratorio específico (Romer et al., 2002a; 2002b; Williams et al., 2002). En un reciente artículo de revisión (McConnell y Romer, 2004), se ha presentado evidencia que sugiere que las propiedades contráctiles de los músculos respiratorios modifican la intensidad de la disnea

percibida a través de cambios en el control motor de los músculos respiratorios. Por lo tanto, en presencia de IMF, los cambios en el control motor de los músculos respiratorios se incrementarían para mantener un nivel dado de rendimiento mecánico de los músculos y la disnea podría ser mejorada (Gandevia et al., 1981). Alternativamente, se ha propuesto una hipótesis que sugiere la intervención de mecanismos periféricos, lo cual implica una mejora de la actividad aferente de los receptores metabólicos de los músculos respiratorios durante la IMF que se relaciona con un incremento en la disnea (Jammes y Balzamo, 1992).

En el presente estudio las reducciones en P_{Imax} posterior al ejercicio en el calor podrían ser secundarias a la deshidratación y/o disponibilidad de sustratos (Febbraio, 2000). Sin embargo, nosotros creemos que esto es improbable porque nuestros sujetos consumieron una bebida deportiva comercial antes y durante las pruebas de resistencia y no encontramos ninguna reducción significativa en la masa corporal posterior al ejercicio en ninguna de las condiciones. El ejercicio en un ambiente caluroso está asociado con una incrementada oxidación de hidratos de carbono y producción de lactato (González-Alonso et al, 1999). El Lactato es uno de los varios metabolitos circulantes del metabolismo muscular que está asociado con la fatiga muscular. Aunque es especulativo porque nosotros no medimos los niveles de lactato sanguíneo en nuestro estudio, es posible que el lactato sanguíneo incrementado contribuyera a la reducción de la fuerza muscular inspiratoria observada post ejercicio en la condición de calor, dado que estas reducciones no estaban presentes en la condición termoneutral. Los aumentos en temperatura corporal central que van de 38-40° C están asociados con la fatiga durante el ejercicio en el calor y pueden estar relacionados a la función del sistema nervioso central (González-Alonso et al., 1999; Nybo y Nielson, 2001). Como todos los sujetos en nuestro estudio pudieron completar los 40 min de ejercicio en ambiente caluroso y los valores de RPE no fueron significativamente diferentes entre las condiciones ambientales, nosotros creemos que la contribución de fatiga central a la IMF observada en este estudio fue mínima. Además, nuestros datos de HG sugieren que el esfuerzo y la motivación de los sujetos estuvieron preservados luego del ejercicio en ambas condiciones ambientales. Además, los cambios en P_{Imax} son sensibles a los cambios en el volumen pulmonar (Coast y Weise, 1990). Los valores de FVC se mantuvieron inalterados antes y después de las pruebas de resistencia en ambas condiciones ambientales, sugiriendo que las reducciones en la P_{Imax} representaron realmente una IMF y no un aumento en el volumen residual.

CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio sugieren que el ejercicio prolongado de moderada intensidad en un ambiente caluroso con el consumo de fluidos *ad libitum* produce reducciones significativas en la fuerza muscular inspiratoria global en mujeres desentrenadas. El mecanismo de esta reducción en la función muscular inspiratoria puede estar relacionado con un compromiso en el flujo sanguíneo hacia los músculos inspiratorios. El mecanismo preciso con el que la IMF inducida por ejercicio ocurre en un ambiente caluroso requiere de mayor investigación. Además, en el calor aumenta la percepción de disnea durante el ejercicio, comparado a una condición termoneutral, a un nivel similar de VE y VO₂ de ejercicio.

Puntos Clave

- En la presente investigación se estudiaron los efectos combinados del calor y el ejercicio sobre la fuerza de los músculos respiratorios en mujeres desentrenadas.
- Estudios previos han mostrado que se requiere de una intensidad muy alta de ejercicio (>80% del VO₂máx) para provocar reducciones en la fuerza de los músculos respiratorios.
- El ejercicio prolongado submáximo (400 min/60% del VO₂máx) en un ambiente caluroso redujo significativamente la fuerza de los músculos respiratorios en mujeres desentrenadas, mientras que la misma intensidad de ejercicio en un ambiente termoneutral no tuvo efecto sobre la función de los músculos respiratorios.
- Esta reducción en la fuerza de los músculos respiratorios puede estar relacionada con la competición por el flujo sanguíneo entre los músculos locomotores, los músculos respiratorios y la circulación cutánea.

Agradecimientos

Los autores quisieran agradecer a los sujetos por su participación entusiasta en este estudio, la asistencia técnica de K.A. Hale durante la fase de recolección de datos del proyecto, y los comentarios útiles proporcionados por el Dr. Robert Sawyer durante la preparación del manuscrito.

Dirección para el envío de correspondencia: James S. Williams, PhD. Associate Professor, Department of Health, Exercise, and Sports Sciences, Box 43011 Texas Tech University, Lubbock, Texas 79409-3011, USA

REFERENCIAS

1. Babcock, M.A., Johnson, B.D., Pegelow, D.F., Suman, O.E., Griffin, D. and Dempsey, J.A (1995). Hypoxic effects on exercise-induced diaphragmatic fatigue in normal healthy humans. *Journal of Applied Physiology* 78, 82-92
2. Babcock, M.A., Pegelow, D.F., Harms, C.A. and Dempsey, J.A (2002). Effects of respiratory muscle unloading on exercise-induced diaphragm fatigue. *Journal of Applied Physiology* 93, 201-206
3. Babcock, M.A., Pegelow, D.F., Johnson, B.D. and Dempsey, J.A (1996). Aerobic fitness effects on exercise-induced low-frequency diaphragm fatigue. *Journal of Applied Physiology* 81, 2156-2164
4. Babcock, M.A., Pegelow, D.F., McClaran, S.R., Suman, O.E. and Dempsey, J.A (1995). Contribution of diaphragmatic power output to exercise-induced diaphragm fatigue. *Journal of Applied Physiology* 78, 1710-1719
5. Black, L.F. and Hyatt, R.E (1969). Maximal respiratory pressures: Normal values and relationship to age and sex. *American Review of Respiratory Disease* 99, 696-702
6. Chen, H. and Kuo, C (1989). Relationship between respiratory muscle function and age, sex, and other factors. *Journal of Applied Physiology* 66, 943-948
7. Cibella, F., Cuttitta, G., Kayser, B., Narici, M., Romano, S. and Saibene, F (1996). Respiratory mechanics during exhaustive submaximal exercise at high altitude in healthy humans. *Journal of Physiology* 494, 881-890
8. Coast, J.R., Haverkamp, H.C., Finkbone, C.M., Anderson, K.L., George, S.O. and Herb, R.A (1999). Alterations in pulmonary function following exercise are not caused by the work of breathing alone. *International Journal of Sports Medicine* 20, 470-475
9. Coast, J.R. and Weise, S.D (1990). Lung volume changes and maximal inspiratory pressure. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation* 10, 461-464
10. Febbraio MA (2000). Does muscle function and metabolism affect exercise performance in the heat? . *Exercise and Sport Science Reviews* 28, 171- 176
11. Gandevia, S.C., Killian, K.J. and Campbell, E.J (1981). The effect of respiratory muscle fatigue on respiratory sensations. *Clinical Science (London)* 60, 463-466
12. Gonzales, J.U., Williams, J.S., Scheuermann, B.W. and James, C.R (2003). Gender differences in respiratory muscle function following exhaustive exercise. *50th Annual Meeting of the American College of Sports Medicine, San Francisco, California. Medicine and Science in Sports and Exercise* 35, 834
13. Gonzalez-Alonso, J., Teller, C., Andersen, S.L., Jensen, F.B., Hyldig, T. and Nielsen, B (1999). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *Journal of Applied Physiology* 86, 1032-1039
14. Harms, C.A., Babcock, M.A., McClaran, S.R., Pegelow, D.F., Nিকেle, G.A., Nelson, W.B. and Dempsey, J.A (1997). Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *Journal of Applied Physiology* 82, 1573-1583
15. Ianzuzo, C.D., Spalding, M.J. and Williams, H (1987). Exercise-induced glycogen utilization by the respiratory muscles. *Journal of Applied Physiology* 62, 1405-1409
16. Inbar, O., Weiner, P., Azgad, Y., Rotstein, A. and Weinstein, Y (2000). Specific inspiratory muscle training in well-trained endurance athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32, 1233-1237
17. Jammes, Y. and Balzamo, E (1992). Changes in afferent and efferent phrenic activities with electrically induced diaphragmatic fatigue. *Journal of Applied Physiology* 73, 894-902
18. Johnson, B.D., Aaron, E.A., Babcock, M.A. and Dempsey, J.A (1996). Respiratory muscle fatigue during exercise: implications for performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 28, 1129-1137
19. Knudson, R.J., Lebowitz, M.D., Holberg, C.J. and Burrows, B (1983). Changes in the normal maximal expiratory flow-volume curve with growth and aging. *American Review of Respiratory Disease* 127, 725-734
20. Larson, J.L., Covey, M.K., Vitalo, C.A., Alex C.G., Patel, M. and Kim, M.J (1993). Maximal inspiratory pressure: learning effect and test-retest reliability in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Chest* 104, 448-453
21. Mador, M.J (1991). Respiratory muscle fatigue and breathing pattern. *Chest* 100, 1430-1435
22. Mador, M.J. and Acevedo, F.A (1991). Effect of respiratory muscle fatigue on breathing pattern during incremental exercise. *American Review of Respiratory Disease* 143, 462-468
23. Mador, M.J., Magalang, U.J., Rodis, A. and Kufel, T.J (1993). Diaphragmatic fatigue after exercise in healthy human subjects. *American Review of Respiratory Disease* 148, 1571-1575
24. Martin, B.J., Morgan, E.J., Zwillich, C.W. and Weil, J.V (1979). Influence of exercise hyperthermia on exercise breathing pattern. *Journal of Applied Physiology* 47, 1039-1042
25. Martin, B.J., Morgan, E.J., Zwillich, C.W. and Weil, J.V (1981). Control of breathing during prolonged exercise. *Journal of Applied Physiology* 50, 27-31
26. McConnell, A.K. and Romer, L.M (2004). Dyspnoea in health and obstructive pulmonary disease: The role of respiratory muscle function and training. *Sports Medicine* 34, 117-132
27. Nybo, L. and Nielsen, B (2001). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *Journal of Applied Physiology* 91, 1055-1060
28. Powers, S.K. and Howley, E.T (2004). Exercise Physiology: Theory and application to fitness and performance. *5th ed. McGraw-Hill, New York*, 216-217
29. Powers, S.K., Howley, E.T. and Cox, R (1982). Ventilatory and metabolic reactions to heat stress during prolonged exercise. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 22, 32-36
30. Romer, L.M., Bridge, M.W., McConnell, A.K. and Jones, D.A (2004). Influence of environmental temperature on exercise-induced inspiratory muscle fatigue. *European Journal of Applied Physiology* 91, 656-663
31. Romer, L.M., McConnell, A.K. and Jones, D.A (2002). Effects of inspiratory muscle training upon recovery time during high intensity, repetitive sprint activity. *International Journal of Sports Medicine* 23, 353-360

32. Romer, L.M., McConnell, A.K. and Jones, D.A (2002). Effects of inspiratory muscle training on time-trial performance in trained cyclists. *Journal of Sports Science* 20, 547-562
33. Rowell, L.B (1986). Human Circulation: Regulation during physical stress. *New York: Oxford University Press*. 174-406
34. Sheel, A.W., Richards, J.C., Foster, G.E. and Guenette, J.A (2004). Sex differences in respiratory exercise physiology. *Sports Medicine* 34, 567-579
35. Sonetti, D.A., Wetter, T.J., Pegelow, D.F. and Dempsey, J.A (2001). Effects of respiratory muscle training versus placebo on endurance exercise performance. *Respiration Physiology* 127, 185-199
36. St Croix, C.M., Morgan, B.J., Wetter, T.J. and Dempsey, J.A (2000). Fatiguing inspiratory muscle work causes reflex sympathetic activation in humans. *Journal of Physiology* 529 Pt 2, 493-504
37. Syabbalo, N.C., Krishnan, B., Zintel, T. and Gallagher, G.C (1994). Differential ventilatory control during constant work rate and incremental exercise. *Respiration Physiology* 97, 175-187
38. Topin, N., Mucci, P., Hayot, M., Prefaut, C. and Ramonatxo, M (2003). Gender influence on the oxygen consumption of the respiratory muscles in young and older healthy individuals. *International Journal of Sports Medicine* 24, 559-564
39. Volianitis, S., McConnell, A.K., Koutedakis, Y., McNaughton, L., Backx, K. and Jones, D.A (2001). Inspiratory muscle training improves rowing performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 33, 803-809
40. White, D.P., Douglas N.J., Pickett, C.W., Weil, J.V. and Zwillich, C.W (1983). Sexual influence on the control of breathing. *Journal of Applied Physiology* 54, 874-879
41. Williams, J.S., Wongsathikun, J., Boon, S.M. and Acevedo, E.O (2002). Inspiratory muscle training fails to improve endurance capacity in athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34, 1194-1198
42. Yanos, J., Wood, L.D., Davis, K. and Keamy, M (1993). The effect of respiratory and lactic acidosis on diaphragm function. *American Review of Respiratory Disease* 147, 616-619

Cita Original

James S. Williams, Kendra A. O'Keefe and Lee T. Ferris. Inspiratory Muscle Fatigue Following Moderate Intensity Exercise In The Heat. *Journal of Sports Science and Medicine* (2005) 4, 239-247