

Monograph

Relaciones entre las Características de la Fatiga Muscular y los Marcadores del Rendimiento en Resistencia

Martyn G Morris¹, Helen Dawes^{1,3}, Ken Howells¹, Oona M Scott^{1,2} y Mary Cramp^{1,2}

¹Movement Science Group, Oxford Brookes University, Gypsy Lane Campus, Oxford, UK.

²University of East London, Stratford Campus, London, UK.

³University of Oxford, Wellington Square, Oxford, UK.

RESUMEN

El propósito del presente estudio fue examinar cual es la relación de diversas características musculares in vivo como determinantes del rendimiento de resistencia. Once hombres saludables completaron un test de ejercicio progresivo en cicloergómetro hasta el agotamiento para la determinación del umbral de lactato, la eficiencia mecánica, la potencia pico y el VO₂máx. En dos ocasiones separadas, se recolectaron datos sobre las características contráctiles y de la fatiga del cuádriceps femoral utilizando un sillón para la medición de la fuerza isométrica diseñado especialmente. La fatiga muscular fue valorada estimulando al músculo durante 3 minutos. La fuerza, la tasa de desarrollo de la fuerza y la tasa de relajación muscular fueron calculadas al comienzo y al final del protocolo de estimulación de 3 minutos examinando la confiabilidad y la relación con el umbral de lactato, el VO₂máx, la eficiencia mecánica y la potencia pico. Las características musculares, la tasa de desarrollo de la fuerza y la tasa de relajación muscular demostraron ser medidas confiables. La reducción en la fuerza a lo largo de los tres minutos (índice de fatiga) tuvo una correlación significativa con el umbral de lactato ($r = -0.72$, $p < 0.01$) pero no con el VO₂máx. La tasa de desarrollo de la fuerza se correlacionó con la potencia pico generada al final del test en cicloergómetro ($r = -0.75$, $p < 0.01$). La tasa de relajación no se correlacionó con ninguno de los marcadores del rendimiento. Hemos hallado que las características musculares totales in vivo, tales como el índice de fatiga y la tasa de desarrollo de la fuerza, se relacionan con los marcadores específicos de los componentes de la aptitud física periférica pero no con los componentes de la aptitud física central. Nuestra investigación sugiere que las características musculares valoradas de esta forma son confiables y pueden ser utilizadas para mejorar nuestra comprensión de los factores periféricos que apuntalan el rendimiento.

Palabras Clave: características contráctiles musculares, umbral de lactato, estimulación eléctrica, VO₂máx

INTRODUCCION

Las características contráctiles musculares son un componente clave del rendimiento en el ejercicio y que pueden ser directamente medidas utilizando técnicas de estimulación eléctrica. En animales, se ha observado que existe una relación directa entre el tipo de fibra muscular y las características musculares estimuladas eléctricamente (Gordon et al., 1990).

En humanos, se han descrito las propiedades contráctiles musculares en un amplio rango de poblaciones clínicas (Harridge et al., 1996; Scott et al., 1990; Scott et al., 1985) así como también se ha confirmado su relación con los tipos de fibras musculares tanto en cadáveres humanos (Dahmane et al., 2005) como en un pequeño número de sujetos (Harridge et al., 2002). La naturaleza no invasiva para la obtención de datos de las características musculares permite su utilización repetida y con esto la oportunidad de monitorear las respuestas musculares al entrenamiento agudo y crónico. Los estudios iniciales sugieren que los cambios en las características musculares luego de la realización de ejercicios dependen de la intensidad del ejercicio (Skof et al. 2006a, 2006b; Theurel et al. 2008) y que las características musculares son un indicador del rendimiento aeróbico durante el ejercicio controlado de extensión de rodillas (Garland et al., 2004). Sin embargo, para nuestro conocimiento no se han explorado completamente las relaciones entre las características musculares de otros determinantes del rendimiento durante la realización de ejercicios. Esta información puede expandir nuestro conocimiento acerca de las propiedades musculares y su relación con el rendimiento durante el ejercicio y la utilidad de las características musculares contráctiles como herramienta para comprender las respuestas musculares a las sesiones individuales de ejercicio y a los regímenes de entrenamiento.

En esta investigación hemos investigado la confiabilidad de las características contráctiles y de la fatiga del músculo cuádriceps femoral y su relación con los marcadores fisiológicos del rendimiento de resistencia en ciclismo. El consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx), la eficiencia mecánica bruta y el umbral de lactato, definido como el porcentaje del VO_2 que provoca un incremento en la concentración de lactato sanguíneo por encima de los valores de reposo, son determinantes del rendimiento comúnmente utilizados para valorar la capacidad de resistencia. Para aunar los hallazgos realizados en estudios con animales (Gordon et al., 1990) y el trabajo llevado a cabo con humanos (Garland et al., 2004) hemos hipotetizado que: (a) una mayor resistencia a la fatiga se correlacionaría con un mayor VO_2 máx, una mayor eficiencia mecánica bruta y un mayor umbral de lactato y (b) una menor reducción en la tasa de desarrollo de la fuerza (RFD) y una menor tasa de relajación (RR) se correlacionarían con un mayor VO_2 máx, una mayor eficiencia mecánica bruta y un mayor umbral de lactato.

MÉTODOS

Once hombres saludables recreacionalmente activos, edad, 26.1 ± 4 años; peso, 78.1 ± 10 kg; talla, 1.79 ± 0.05 m; participaron en el estudio. Luego de haberle informado a los sujetos los riesgos asociados con su participación, cada sujeto proveyó su consentimiento informado por escrito. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad y fue llevado a cabo de acuerdo con la Declaración de Helsinki (2000).

Todos los sujetos realizaron sesiones de familiarización con los procedimientos de evaluación antes de participar en el estudio. Las sesiones de familiarización permitieron que los sujetos experimenten la sensación provocada por la estimulación eléctrica. En el caso de que alguno de los sujetos no estuviera familiarizado con los métodos para la recolección del aire espirado, la familiarización con este procedimiento también se llevó a cabo en estas sesiones. Luego de las sesiones de familiarización, los sujetos se presentaron al laboratorio en tres ocasiones, separadas por una semana. En las sesiones de evaluación 1 y 2 se llevó a cabo la recolección de los datos del rendimiento muscular. En la sesión de evaluación 3 se llevó a cabo la recolección de los datos del VO_2 máx, umbral de lactato y eficiencia mecánica bruta. Para minimizar los efectos de las variaciones diarias, todas las sesiones de evaluación se llevaron a cabo a la misma hora del día (± 2 horas). Antes de las evaluaciones se les pidió a los sujetos que evitaran realizar ejercicios vigorosos en las 48 hs previas a la sesión de evaluación, que mantuvieran sus hábitos dietarios normales, y que arribaran al laboratorio en estado de euhydratación.

Medición del Rendimiento Muscular

Los datos de la función muscular del cuádriceps femoral fueron recolectados utilizando un sillón para la evaluación de la fuerza isométrica especialmente diseñado y un transductor de torque con un indicador de tensión cuádruple (Figura 1). Las señales eléctricas provenientes del transductor de torque fueron amplificadas (Digitimer Neurolog NL107 Recorder Amplifier) y digitalizadas (Cambridge Electronic Design, micro1401). Los datos del torque producido a partir de contracciones isométricas voluntarias máximas (MVIC) y a partir de las contracciones evocadas eléctricamente en el cuádriceps femoral fueron registradas en una PC para el subsiguiente análisis estadístico utilizando un programa para el análisis de datos Spike (Spike 2 Version 5.0 for Windows).

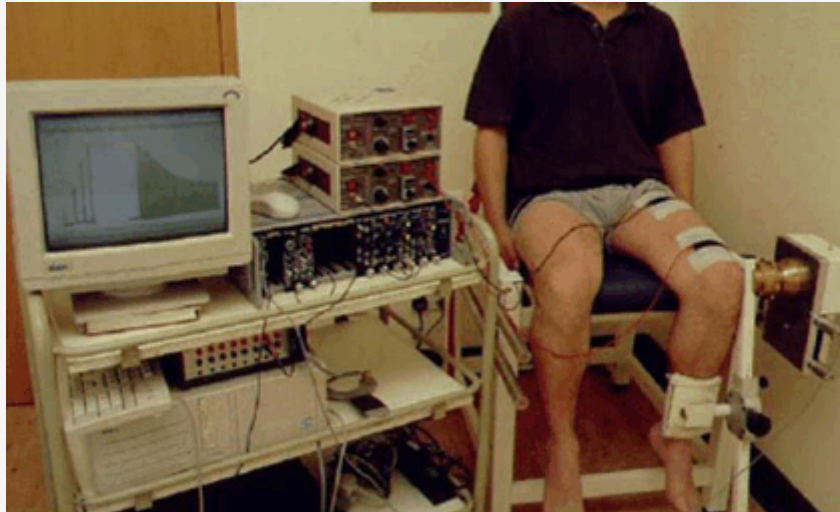


Figura 1. Ejemplo de un sujeto sentado en el sillón para la evaluación de la fuerza isométrica.

Los sujetos se colocaron en posición de sentados, con el tronco erguido, y las rodillas y caderas con un ángulo articular de 90°. Los hombros y los muslos fueron fijados utilizando correas para restringir el movimiento del tren superior y así aislar la acción muscular. El eje del brazo de palanca adjunto al transductor de torque fue alineado con el eje de extensión-flexión de la rodilla mientras la tibia del sujeto se encontraba colocada detrás de una placa conectada al brazo de palanca, 3 cm por encima del maléolo lateral. El sillón de evaluación era ajustable y la posición de los sujetos fue registrada para repetirla en las subsiguientes evaluaciones. Los sujetos fueron instruidos para que ejercieran la máxima fuerza posible contra la placa. En cada sesión de evaluación se realizaron MVICs de 5 segundos. Cada esfuerzo estuvo separado por una pausa de 1 minuto. Si el torque producido en la última MVIC era el mayor, se llevaban a cabo contracciones adicionales hasta que no se observara una mejora adicional. La MVIC fue medida como el valor pico obtenido a partir de las contracciones registradas y se utilizó este valor para establecer la amplitud apropiada del estímulo eléctrico.

La estimulación eléctrica fue llevada a cabo aplicando la misma al músculo con un estimulador de corriente continua Digitimer DS7 a través de dos electrodos de goma de carbono (EMS), uno colocado proximalmente sobre el vientre del recto femoral y el otro colocado distalmente sobre el vasto medial. El estímulo eléctrico fue de la intensidad suficiente como para proxocar producciones de fuerza próximas al 20% de la MIVC de los sujetos con una frecuencia de 40 Hz. La fatiga muscular fue valorada utilizando una modificación del protocolo de Burke (Burke et al., 1973). Este protocolo implica la estimulación del músculo a 40Hz durante 250 ms cada segundo durante 180 segundos. El ancho del pulso fue establecido a 300µs con una intensidad de estimulación en el rango de 60-100 mA.

La magnitud de la fatiga fue calculada como el porcentaje de la reducción inicial de torque a lo largo del período de 180s utilizando la siguiente ecuación: Índice de Fatiga (FI) = (Fuerza Inicial - Fuerza Final/Fuerza Inicial) x 100.

Un índice de fatiga bajo es indicativo de una mayor resistencia a la fatiga y un mayor índice de fatiga es indicativo de una menor resistencia a la fatiga.

Los cambios en la tasa de desarrollo de la fuerza y en la tasa de relajación también se calcularon en base a la producción de fuerza, al comienzo y al final del test de fatiga. La contracción inicial, al comienzo del protocolo siempre fue ignorada. Los cálculos fueron llevados a cabo entre la segunda contracción y la contracción final. La tasa de desarrollo de la fuerza y la tasa de relajación se calcularon a partir del dF/dt (Gordon et al., 1990). La RFD fue calculada a partir de la pendiente de la curva de la fuerza desde el inicio hasta el pico de fuerza seguido a la estimulación eléctrica. La RR fue calculada a partir de la pendiente de la curva de la fuerza desde el pico de fuerza hacia atrás hasta el valor basal y desde el pico de fuerza hasta la mitad del pico de fuerza ($RR_{1/2}$) (Figura 2).

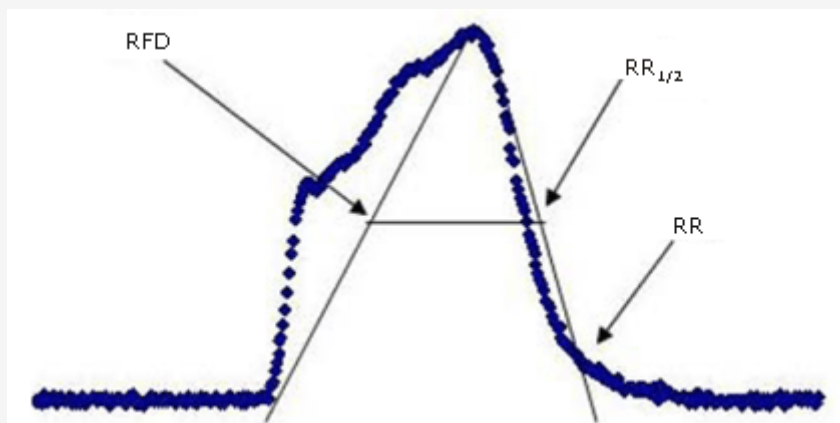


Figura 2. Cálculo de la RFD, RR_{1/2} y de la RR sobre la producción de torque individual. RFD = tasa de desarrollo de la fuerza, RR = tasa de relajación.

El valor basal fue establecido al comienzo de la sesión de evaluación y fue definido como una curva estable de fuerza en reposo durante un período de 2 min previo al comienzo de la estimulación eléctrica. El valor basal se mantuvo estable a lo largo de la sesión de evaluación. También se valoraron el cambio en la tasa de desarrollo de la fuerza y en la tasa de relajación. El cambio en la tasa de desarrollo de la fuerza (%RFD) fue calculado como el porcentaje de cambio en la tasa de desarrollo de la fuerza entre el comienzo y el final del test de fatiga. El cálculo del porcentaje de cambio en la tasa de relajación (%RR) y el porcentaje de cambio en la RR_{1/2} (%RR_{1/2}) fue similar al utilizado para el %RFD.

Medición del Consumo Máximo de Oxígeno (VO₂máx) y del Umbral de Lactato (LT)

Los tests se llevaron a cabo en un cicloergómetro con cupla electromagnética (Lode, Gronigen, The Netherlands). Cada sujeto realizó una entrada en calor de 5 minutos antes de realizar el protocolo de ejercicio progresivo similar al utilizado por Burnley et al (2000). Los sujetos fueron instruidos para que mantuvieran una cadencia de 80 RPM durante todo el test. El test comenzó con una carga de 70-100 W, la que se incrementó en 20W cada 4 minutos. Al final de cada etapa de 4 minutos, se obtuvieron muestras de sangre en la yema de los dedos para el análisis del lactato sanguíneo (Analox PGM-7, Hammersmith, London, UK). Una vez que se la concentración de lactato se incrementara en 1 mmol·L⁻¹ por encima del valor basal, alcanzado con las cargas previas, la carga de trabajo se incremento en 20W cada minuto hasta el agotamiento volitivo. El intercambio de gases pulmonares se midió respiración por respiración utilizando un sistema analizador de gases automático (Oxycon Gamma, Jaeger, Hoechberg, Germany). Antes de cada test, los analizadores de gases fueron calibrados con gases de concentración conocida y el volumen de flujo fue calibrado utilizando una jeringa de 3 L (Hans Rudolph) de acuerdo con las especificaciones de los fabricantes. Los sujetos utilizaron una pinza nasal y respiraron a través de una boquilla conectada a un transductor de volumen de baja resistencia (Jaeger Triple V, Hoechberg, Germany). La frecuencia cardíaca fue registrada continuamente a lo largo del protocolo de evaluación utilizando telemetría de corto alcance (Polar S810, Finland). El VO₂ en estado estable fu calculado como el VO₂ promedio de los últimos 60 s de cada etapa de 4 minutos, mientras que el VO₂máx fue definido como el mayor valor obtenido en los últimos 60 segundos previos a la finalización del test. La producción pico de potencia (PPO) fue calculada como la sumatoria de la carga final completada y la fracción de la carga parcialmente completada antes del agotamiento (Moseley et al. 2001). El umbral de lactato fue identificado como el punto en el cual al concentración de lactato se incrementa en 1 mmol·L⁻¹ por encima del valor basal, lo cual se evidencio en las gráficas de la concentración de lactato versus la carga de trabajo. Este umbral fue expresado como un porcentaje del VO₂máx.

Eficiencia Mecánica Bruta (GME)

Para todas las cargas de trabajo por debajo del umbral de lactato y por debajo del índice de intercambio respiratorio (RER) de 1.00, se calculó la GME como el cociente entre la carga real (Kcal·min⁻¹) y el de gasto calórico (Kcal·min⁻¹) (Sidossis et al., 1992). El gasto energético (Kcal·min⁻¹) fue calculado a partir de los datos del VO₂ y el RER (Lusk, 1924).

Análisis Estadísticos

La estadística descriptiva incluyo la media y la desviación estándar de todas las variables medidas. Se valoró la confiabilidad test-retest de las características contráctiles utilizando la prueba *t* de Student, el coeficiente de correlación interclase [3,1] y el análisis de los sesgos y del error aleatorio.

Se evaluó la normalidad de todos los datos. La relación entre las variables fue examinada utilizando el coeficiente de correlación de Pearson (una cola) para valorar si existía alguna relación entre las características musculares medidas y el VO_2 máx, la potencia pico, el LT y la GME. Se halló que la regresión lineal era la que mejor describía la relación entre todas las variables medidas, lo que se llevó a cabo mediante la inspección visual y la examinación de los valores de R y R². Debido a los múltiples tests realizados, la significancia estadística se estableció a $p < 0.01$ luego del ajuste de Bonferroni para evitar el error Tipo I.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los valores medios y las desviaciones estándar del VO_2 máx, el LT, la eficiencia mecánica bruta (GME), el índice de fatiga y del % de reducción en el desarrollo de la fuerza (RFD) y de la tasa de relajación (RR).

Confiabilidad del Test de Rendimiento Muscular (MPT)

Se valoró la confiabilidad de las mediciones del índice de fatiga, el cambio en la RFD, la RR y la $RR_{1/2}$ realizadas mediante el protocolo de estimulación eléctrica. El análisis de la confiabilidad test-retest indicó una alta confiabilidad para el índice de fatiga y para el cambio en la RFD (Tabla 2). El % de cambio en la RR mostró una baja confiabilidad test-retest lo cual se evidenció por un bajo valor del ICC. Sin embargo, el % de cambio en la $RR_{1/2}$ mostró una alta confiabilidad. Los datos del $RR_{1/2}$ fueron utilizados en los análisis de correlación.

	Media	DE
VO_2 máx ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)	55.3	8.8
Potencia Pico (W)	336.4	42.9
LT (% VO_2)	61.3	6.8
GME (%)	18.4	1.0
Índice de Fatiga (%)	39.6	8.9
% Cambio en la RFD	44.2	15.9
% Cambio en la RR	48.8	26.9
% Cambio en la $RR_{1/2}$	36.3	17.1

Tabla 1. Datos de los determinantes del rendimiento de resistencia y de las características musculares (medias \pm desviación estándar). VO_2 máx = consumo máximo de oxígeno; LT = umbral de lactato; GME = eficiencia mecánica bruta; RFD = tasa de desarrollo de la fuerza, RR = tasa de relajación.

Relación entre las Características Musculares Medidas y las Medidas del Rendimiento de Resistencia

El índice de fatiga se correlacionó significativamente con el umbral de lactato, con lo cual los sujetos que mostraron una baja resistencia a la fatiga también exhibieron un bajo umbral de lactato y viceversa (Figura 3). En contraste no se halló una correlación significativa entre el FI y el VO_2 máx, la GME y la potencia pico. La Tabla 3 muestra las correlaciones entre el FI y las medidas de rendimiento en resistencia. También se halló una correlación significativa entre el FI y el %RFD ($r = 0.79$, $p < 0.01$). Se observó una correlación significativa entre el % de cambio en la RFD y la potencia pico, con lo cual los sujetos que exhibieron la mayor reducción en la RFD también exhibieron una mayor PPO (Figura 4). No se hallaron correlaciones significativas entre el % de cambio en la $RR_{1/2}$ y las diversas medidas del rendimiento en resistencia.

	Prueba t	95% CI	95% CI	Sesgo	Error Aleatorio	ICC [3,1]	ICC CI Inferior	ICC CI Superior
Índice de Fatiga	-0.26	-10.27	8.37	-0.95	17.4	0.87	0.34	0.98
% de Cambio en la RFD	-0.56	-14.30	8.95	11.60	62.2	0.72	0.02	0.95
% de Cambio en la RR	0.30	-23.00	29.5	3.26	55.7	0.14	-0.63	0.77
% de Cambio en la RR _{1/2}	-1.06	-2.58	1.01	-0.37	1.00	0.92	0.60	0.99

Tabla 2. Confiabilidad test-retest de la tasa de desarrollo de la fuerza, la tasa de relajación, el % de cambio en la RFD, el % de cambio en la RR y el % de cambio en la RR_{1/2}. ICC = coeficiente de correlación interclase; RFD = tasa de desarrollo de la fuerza; RR = tasa de relajación.

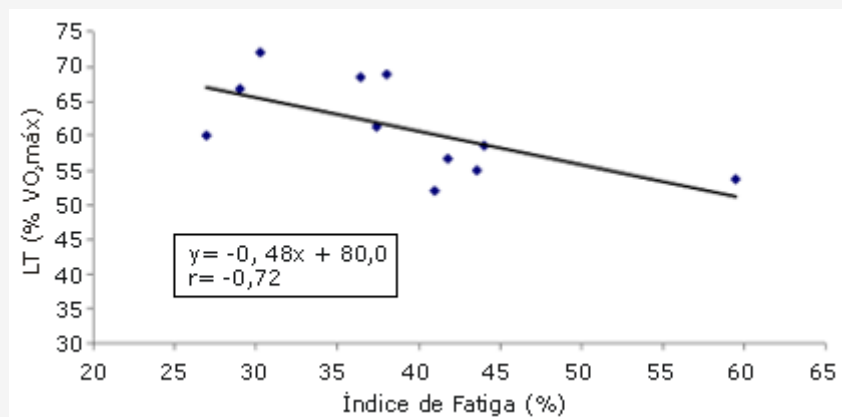


Figura 3. Correlación entre el umbral de lactato (LT) y el índice de fatiga.

DISCUSION

De acuerdo con las observaciones previas de que los individuos entrenados en resistencia tienen músculos menos fatigables (Garland et al., 2004), en el presente estudio hemos observado que las características contráctiles y de la fatiga estuvieron relacionadas con los determinantes específicos de la resistencia. En el presente estudio se ha hallado que los sujetos que exhibieron una mayor resistencia a la fatiga durante el protocolo para inducir fatiga muscular también exhibieron un mayor umbral de lactato en el test de ejercicio en cicloergómetro. Interesantemente, el índice de fatiga no se correlacionó con los marcadores generales del rendimiento cardiovascular como el VO₂máx. Nuestras observaciones respaldan la evidencia de que el umbral de lactato refleja en forma específica el rendimiento muscular y no el rendimiento cardiovascular (Farina et al., 2007; Gladdon, 2000). En contraste, las otras características contráctiles medias por el cambio en la tasa de desarrollo de la fuerza durante el test de fatiga muscular se relacionaron con la capacidad de los individuos para alcanzar un mayor pico de potencia, pero no con las medidas metabólicas obtenidas durante el test de ejercicio. Los individuos que exhibieron un menor cambio en la tasa de desarrollo de la fuerza pudieron haber continuado ejercitándose durante el test de ejercicio. En estudios llevados a cabo con animales, las características de la tasa de desarrollo de la fuerza han mostrado reflejar la composición subyacente de fibras musculares (Gordon et al., 1990), y por lo tanto pueden reflejar el perfil de isoformas de miosina de los individuos. Las características contráctiles musculares pueden proveer una indicación de diferentes áreas de rendimiento. Es importante señalar que el análisis de la confiabilidad de las características contráctiles sugiere una buena repetitibilidad para la valoración día a día de la función muscular. El % de cambio en la RR_{1/2} mostró una alta confiabilidad en comparación con el % de cambio en la tasa de relajación (% de cambio en la RR) por lo que recomendamos utilizar la primera variable para la medición de la relajación muscular.

El umbral de lactato, una medida del control metabólico durante el ejercicio, mostró una fuerte correlación con el

rendimiento de resistencia, y tuvo una correlación lineal inversa con el índice de fatiga. La investigación ha mostrado que los individuos con músculos menos fatigables producen menos lactato durante el ejercicio, tienen un mayor umbral de lactato y son capaces de desempeñarse a mayores intensidades relativas de ejercicio por períodos prolongados de tiempo (Coyle, 2005). El % de cambio en la RFD se correlacionó significativamente con la PPO, con lo cual los sujetos que exhibieron una mayor PPO durante el test máximo en cicloergómetro también exhibieron una mayor alteración en la tasa de desarrollo de la fuerza. Un factor que posiblemente haya afectado este hallazgo es la composición de las fibras musculares. La tasa de desarrollo de la fuerza se incrementa desde las fibras tipo I