

Monograph

Diferencias en el Curso Temporal del Rendimiento Muscular Voluntario y Evocado Eléctricamente Durante y Después de Ejercicios de Estiramiento-Acortamiento

Albertas Skurvydas, Gediminas Mamkus, Vilma Dudonienė, Sigitas Kamandulis, Dalia Mickeviciene, Nerijus Masiulis, Aleksas Stanislovaitis y Vytautas Streckis

Laboratory of Human Motorics, Department of Applied Physiology and Health Education, Lithuanian Academy of Physical Education, Kaunas, Lithuania.

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue establecer la dinámica de la fuerza de contracción voluntaria máxima (MVCF), de la altura del salto con caída (DJ) y fuerza muscular del cuádriceps evocada eléctricamente a diferentes frecuencias de estimulación durante y después de 100 DJS (ejercicio de estiramiento-acortamiento, SSE). En el estudio participaron hombres sanos y desentrenados ($n = 11$, edad = 21.8 ± 1.7 años). Los DJ se realizaron desde una altura de 0.5 metros con un contramovimiento hasta alcanzar un ángulo en la rodilla de 90 grados y un inmediato rebote máximo y con intervalos de 30 segundos entre saltos. Durante los SSE (después de 10, 50, 100 DJ) así como a las 1, 4, 8, 24, 48 y 72 horas después del SSE, se llevaron a cabo mediciones de la fuerza del cuádriceps evocada con estimulación eléctrica a frecuencias de 1 Hz (Pt), 20 Hz (P20) y 100 Hz (P100) (rendimiento evocado eléctricamente, EEP), MVCF y la altura del DJ (rendimiento voluntario, VEP). El curso temporal de la P20 y la P100 durante y después del SSE fue dependiente del tiempo (ANOVA: $p < 0.001$) y la frecuencia (ANOVA: $p < 0.001$). La fuerza evocada a Pt, P20 y P100 se redujo significativamente ($p < 0.01$) más que la MVCF y la H del DJ durante SSE. Al comienzo del SSE (durante 1-10 DJS) P20 y P100 se redujeron significativamente ($p < 0.001$) más que durante 11-50 y 51-100 DJS. Hubo un incremento significativo ($p < 0.05$) en Pt, P20 y P100 entre las 8 y las 48 horas, mientras que la altura del DJ y la MVCF disminuyeron significativamente en ese tiempo. En conclusión, las diferencias en el curso temporal de VEP y EEP son más evidentes al comienzo del SSE, donde VEP no cambia y EEP disminuye y en las 8-48 horas posteriores al SSE, donde VEP disminuye y EEP aumenta.

Palabras Clave: salto con caída, daño muscular, estimulación eléctrica, fatiga de baja frecuencia

INTRODUCCION

Frecuentemente el daño muscular inducido por el ejercicio (EIMD) ocurre luego de realizar ejercicios a los que no se está acostumbrado, particularmente si el ejercicio involucra una gran cantidad de contracciones excéntricas (Byrne et al., 2004;

Clarkson y Hubal, 2002; Nosaka y Clarkson, 1996). Los síntomas del EIMD incluyen la alteración de la estructura muscular intracelular, del sarcolema y de la matriz extracelular (Clarkson y Hubal, 2002; Lieber y Friden, 2002; Nosaka y Clarkson, 1996; Proske y Allen, 2005; Warren et al., 2001), problemas prolongados de la función del músculo, medido tanto durante contracciones estimuladas eléctricamente como durante contracciones voluntarias (Byrne et al., 2004; Faulkner et al., 1993; Warren et al., 1999), manifestación de fatiga de baja frecuencia (LFF) (Rijkelijhuizen et al., 2005), pérdida de proteínas de las fibras musculares dañadas, inflamación aguda y dolor muscular de inicio retrasado, rigidez e inflamación (Clarkson y Hubal, 2002; Friden y Lieber, 2001; MacIntyre et al., 2001; Nosaka y Clarkson, 1996).

Por lo general se considera que existen dos evidencias claras de daño en el músculo inmediatamente después que se lo ha sometido a una serie de contracciones excéntricas. Estos son, la presencia de interrupciones en las estructuras que producen fuerza y el daño en el sistema de acoplamiento de excitación-contracción (Proske y Allen, 2005; Warren et al., 2001; 2002). El primer daño mecánico genera una cascada de eventos que produce un severo daño muscular de inicio retrasado secundario entre 1 y 3 días después del daño inicial (Clarkson y Hubal, 2002; Faulkner et al., 1993).

Se ha demostrado que la pérdida de fuerza luego del EIMD es independiente de la acción muscular que ha sido realizada (isométrica, concéntrica o excéntrica) (Byrne y Eston, 2002). Sin embargo, el daño de la función muscular se atenuó cuando se utilizó el ciclo de estiramiento-acortamiento en el salto vertical (Byrne y Eston, 2002). Aunque, Horita et al. (2003) concluyeron que la actividad muscular concéntrica (salto desde sentadilla) parece no verse afectada con el posible daño muscular, como sí ocurre en el salto con caída (*drop jump*). Estos investigadores especularon que estas respuestas únicas, se pueden explicar por la importancia de la estructura muscular en las actividades que involucran ciclos de estiramiento-acortamiento y los diferentes comandos motores y/o estrategias de control entre el ciclo de estiramiento-acortamiento y las acciones concéntricas.

A pesar de la obvia presencia de síntomas directos e indirectos del EIMD, todavía se debe aclarar no solo el mecanismo del daño en sí mismo sino también su efecto el curso temporal de la función muscular y el rendimiento neuromuscular. Se concluyó recientemente que no hay explicaciones simples para la pérdida de la fuerza luego de contracciones excéntricas, dado que la pérdida de la fuerza es resultado de complejas interacciones de diversos mecanismos (Butterfield y Herzog, 2005; Prasartwuth et al., 2005; Warren et al., 2002). El objetivo de del presente trabajo de investigación es clarificar los siguientes aspectos: 1) Las diferencias en la dinámica del rendimiento voluntario (VEP) y rendimiento muscular evocado eléctricamente (EEP) no sólo durante ejercicio de estiramiento-acortamiento (SSE) sino también inmediatamente después de de ejercicios que involucran acciones SSE, y también 1, 4, 8, 24, 48 y 72 horas posteriores al SSE 2) La dinámica del rendimiento muscular voluntario, durante y después del SSE ¿Depende del tipo de contracción muscular (isométrica vs. estiramiento acortamiento)? 3) ¿Existe alguna relación de la dinámica del rendimiento de la fuerza muscular evocada eléctricamente (durante y después de SSE) con la frecuencia de estimulación muscular? El objetivo principal del presente estudio es esclarecer estos temas.

METODOS

Sujetos

En el estudio participaron hombres saludables y desentrenados (media \pm DE: edad = 21.8 ± 1.7 años, peso corporal = 74.2 ± 4.7 kg, altura = 1.80 ± 0.04 metros; n = 11). Los sujetos desentrenados eran físicamente activos pero no participaban en ningún ejercicio físico formal ni en ningún programa deportivo. Los sujetos, no participaron en ningún programa de entrenamiento de piernas o saltos en los últimos años. Cada uno leyó y firmó el consentimiento informado de acuerdo con principios destacados en la Declaración de Helsinki. Este estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad de Medicina de Kaunas.

Ejercicio de Estiramiento-Acortamiento

Los sujetos realizaron 100 saltos con caída (DJs) de manera intermitente (30 segundos de pausa entre los saltos) desde una altura de 0.5 metros con un contra-movimiento hasta un ángulo en la rodilla de 90 grados y un inmediato rebote máximo. Los períodos de recuperación luego de los saltos 10 y 50 fueron de 4 - 5 minutos aproximadamente debido a las evaluaciones de fuerza realizadas. Durante los saltos el sujeto debía colocar sus manos en la cintura. El sujeto se colocó de pie en una plataforma de 0.5 metros de altura, por ejemplo con su pierna izquierda, la pierna en la que la fuerza de contracción no se evaluó. Luego de cada salto, se le informaba los participantes la altura del mismo y se los motivaba para que realicen el salto tan alto como les sea posible. Antes de SSE y durante la recuperación, los saltos con caída de control se realizaban con la misma técnica que durante el SEE. La altura del DJ se calculó aplicando la siguiente ecuación:

$$h = g \times t^2 / 8$$

Donde h = altura para el salto con caída, g = aceleración de la gravedad (9.81 m·s⁻²), t = tiempo de vuelo (s). (Bosco et al., 1982). Un protocolo similar se utilizó en investigaciones previas (Skurvydas et al., 2006).

Mediciones de la Función Muscular

El equipamiento y la técnica para la medición de la fuerza muscular fue la misma que se utilizó en estudios previos (Ratkevicius et al., 1998, Skurvydas et al., 2006). Para la medición de la fuerza se utilizó un sillón experimental. Los sujetos se sentaron (derechos) en el sillón que poseía un soporte vertical para apoyar la espalda. Una correa aseguraba la cadera y los muslos para minimizar los movimientos involuntarios. La pierna derecha fue sujeta con una abrazadera a un dinamómetro, con la rodilla flexionada en un ángulo de 90 grados. Se utilizó una abrazadera de 6 cm. de ancho, que se ubicó alrededor de la pierna, en la parte proximal del maléolo, y que fue sujeta de manera firme a un transductor diferencial variable lineal. La salida del transductor, fue amplificada en proporción a la fuerza isométrica de extensión de la rodilla y digitalizada a una frecuencia de muestreo de 1 kHz con un convertidor análogo a digital de 12-bit que estaba instalado en la computadora personal. La señal digitalizada se almacenó en un disco duro para análisis posteriores. Además, la salida del transductor de fuerza se mostraba en un voltímetro que estaba colocado al frente del sujeto.

El equipamiento y el procedimiento para la estimulación eléctrica fue esencialmente la misma que se describió previamente (Ratkevicius et al., 1998, Skurvydas et al., 2006). Se utilizó un estimulador de alto voltaje (MG 440, Medicor, Budapest, Hungary). El estímulo eléctrico llegaba al cuádriceps a través de unos electrodos superficiales (9x18 cm) acolchados con tela de algodón embebida en solución salina. Uno de los electrodos de estimulación se situó justo por encima de la rótula, mientras que el otro cubría una gran parte del vientre muscular en el tercio proximal del muslo. La estimulación eléctrica siempre se emitió en secuencias de ondas cuadradas con pulsos de 1 ms de duración (voltaje de 150 V). Se eligió el mayor voltaje de estimulación posible con el objetivo de reclutar el mayor número de fibras posible. Los sujetos recibieron estimulación eléctrica antes del comienzo de las pruebas. Antes de la estimulación muscular a 150 V, los sujetos recibieron estimulaciones eléctricas más pequeñas (se estimuló al músculo 2-3 veces con un solo estímulo de 70-90 V).

Se llevaron a cabo las siguientes mediciones: fuerza del cuádriceps a través de estimulación eléctrica a frecuencias de 1 Hz (Pt), 20 Hz (P20) y de 100 Hz (P100) (cada serie de estimulación eléctrica duró 1 segundo), también se evaluó la máxima fuerza de contracción voluntaria (MVCF) (se alcanzó el máximo de la MVCF y se lo mantuvo durante 2 segundos antes de dejarlo relajar). Además, se determinó el tiempo de contracción de Pt (Ct) y el tiempo de relajación hasta la mitad de Pt (Rt). La pausa entre la electroestimulación fue de 10 segundos, y entre las mediciones de MVCF fue de 1 minuto. El cambio en la relación de P20/P100 posterior al ejercicio, se utilizó para la evaluación de LFF (Jones, 1996, Skurvydas y Zahovajevs, 1998, Martin et al, 2004). Con el objetivo de establecer la dinámica de la fatiga muscular durante los 100 DJs, se evaluó la disminución del P20, P100, la relación P20/P100 medida en porcentaje por salto en los primeros 10 DJs, del salto 11 al 50 DJs y del 51 al 100DJs. El índice de fatiga (FI) en porcentaje por salto se calculó con la siguiente fórmula: (Valor previo SSE - Valor posterior a los saltos)/ Valor previo SSE/n saltos x 100 (%). Cuando se midió el FI luego de 10 saltos, n era igual a 10; cuando se medía entre el salto 11 y el 50DJs, n era igual a 40 y cuando se medía entre el salto 51 y el 100DJs, n era igual a 50.

Actividad Plasmática de la Creatinquinasa

Se extrajeron aproximadamente 5 ml de sangre de la vena cubital (antes del ejercicio así como 24 y 48 horas post ejercicio). Las muestras de plasmas fueron centrifugadas y almacenadas en un congelador a una temperatura de -20°C hasta la realización de los análisis. La actividad de la creatinquinasa plasmática (CK, IU/L) se determinó utilizando un analizador bioquímico automático "Monarch" (Instrumentation Laboratory SpA, USA-Italy).

Dolor Muscular

El dolor muscular fue reportado utilizando una escala visual subjetiva, que tenía un rango de 0 a 10; donde el 0 representaba "ausencia de dolor" y el 10 "dolor intenso intolerable". Estos métodos de evaluación del dolor muscular, se han utilizado en nuestras investigaciones previas (Skurvydas et al., 2006). Se le pedía a cada uno de los participantes que indicaran la intensidad del dolor en su cuádriceps cuando se realizaba una compresión muscular, así como cuando estaban parados y caminando al comienzo de cada sesión diaria.

Protocolo experimental

Luego de medir la actividad de la CK en sangre, el sujeto se sentó en el sillón experimental y luego de 5 minutos, se registraron las propiedades contráctiles del músculo en la siguiente secuencia: Pt, P20, P100 y MVCF (se alcanzó la MVCF tres veces y se tuvo en cuenta el mejor valor para la evaluación). Antes de que se evaluara la altura de los DJ de cada

sujeto, se llevó a cabo una entrada en calor que consistió en 5 minutos de trote en el lugar, con una intensidad correspondiente a una frecuencia cardiaca (HR) de 130-150 latidos por minuto (correspondiente a aproximadamente el 70% de la HR máxima). Luego, el sujeto realizó 10 sentadillas. La frecuencia cardiaca se midió con un monitor Polar (Polar Electro) (Skurvydas et al., 2006). Luego se determinó la altura de los DJs. Aproximadamente 1 minuto después se comenzó con el SSE. Luego de 10, 50 y 100 DJs los sujetos se sentaban en el sillón experimental y se registraban las propiedades de la contracción muscular voluntaria y evocada eléctricamente (se registraron después de 2-3 minutos luego de finalizarse los saltos). También se registró la MVC pero sólo dos veces. A las 1, 4, 8, 24, 48 y 72 horas después del SSE se repetía el procedimiento de evaluación que se realizó antes de agregar la carga. Además, 24, 48 y 72 horas después del SSE se determinaba el dolor muscular, y la actividad de la CK se determinaba luego de 24 y 48 horas después del SSE.

Análisis Estadísticos

Los datos descriptivos se muestran como medias \pm DE. Se utilizó el análisis de varianza de dos vías (ANOVA) para medidas repetidas, para determinar los efectos del tiempo (10 niveles: antes, después de 10, 50 y 100 DJ así como durante la recuperación en 1, 4, 8, 24, 48 y 72 horas) y las frecuencias de estimulación (2 niveles: 20 Hz y 100 Hz) sobre las propiedades contráctiles del cuádriceps. Además se determinó el efecto del tiempo y el tipo de contracción (2 niveles: isométrico vs. estiramiento-acortamiento). En el caso de que se encontraran efectos significativos, se realizó una prueba post hoc utilizando una prueba *t* para muestras apareadas, con la corrección Bonferroni para comparaciones múltiples. El nivel de significancia fue establecido en 0.05. Para evaluar la relación entre los síntomas indirectos de EIMD, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los valores de VEP y EEP previos al ejercicio (media \pm DE). En la Figura 1 y 2 (el efecto del tiempo para todas las características fue de $p < 0.001$) se muestran el curso temporal de la altura de los DJs, MVCF, Pt, P20 y P100 durante y después del SSE. El curso temporal de la MVCF y de la altura del DJ durante y después del SSE fue dependiente del tipo de contracción (ANOVA entre MVCF y altura del DJ: $p < 0.001$). La altura del DJ antes del SSE fue de 40.2 ± 10.1 cm en comparación con los 36.0 ± 8.5 cm que se obtuvieron luego de SSE ($p < 0.01$). La altura del DJ disminuyó un 10.3 ± 4.9 % luego del SSE, mientras que MVCF luego de SSE disminuyó un 17.4 ± 7.4 %.

Pt (N)	Ct (ms)	Rt (ms)	P20 (N)	P100 (N)	P20/P100	MVCF	Altura del DJ (cm)
79.7 (27.8)	78.5 (9.7)	58.4 (13.9)	274.7 (21.1)	319.4 (76.2)	0.88 (.11)	596.2 (23.4)	40.2 (10.1)

Tabla 1. Valores previos al ejercicio de los índices de rendimiento del cuádriceps durante las contracciones inducidas por electroestimulación y MVCF en hombres ($n=11$). Los datos se presentan como medias (\pm DE). Pt, P20 y P100 - la fuerza de contracción evocada a través de la estimulación del cuádriceps con frecuencias de 1 Hz, 20 Hz y 100 Hz. Ct - Pt tiempo de contracción; Rt - tiempo de relajación hasta mitad del Pt; MVCF - contracción máxima voluntaria; Altura del DJ - Altura de los saltos con caída.

El curso temporal de P20 y P100 durante y después de SSE fue dependiente del tiempo y la frecuencia (ANOVA: $p < 0.001$; Figura 1). Pt, Ct y Rt disminuyeron significativamente luego de SSE y Pt y Ct no se recuperaron hasta 72 horas después ($p < 0.05$, en comparación con los valores previos al ejercicio; Figura 2), mientras que el Rt no se modificó en relación a los niveles previos al ejercicio ($p > 0.05$). Después de 10 DJs hubo una disminución significativa en P20 y P100 (ambos: $p < 0.05$), la altura del DJ y MVCF tuvieron una disminución significativa después de 50 DJs ($p < 0.01$) y todos estos parámetros no se recuperaron hasta pasadas 72 horas (Figura 1). Es interesante destacar que, incluso después de los primeros 10 DJs, apareció el LFF y no cesó dentro de las 72 horas ($p < 0.05$, en comparación con los valores previos al ejercicio; Figura 3). El porcentaje de disminución por salto en P20, P100 y en la relación P20/P100 de 1 a 10 DJs fue significativamente mayor que en los DJs 11 a 100 (Figura 4).

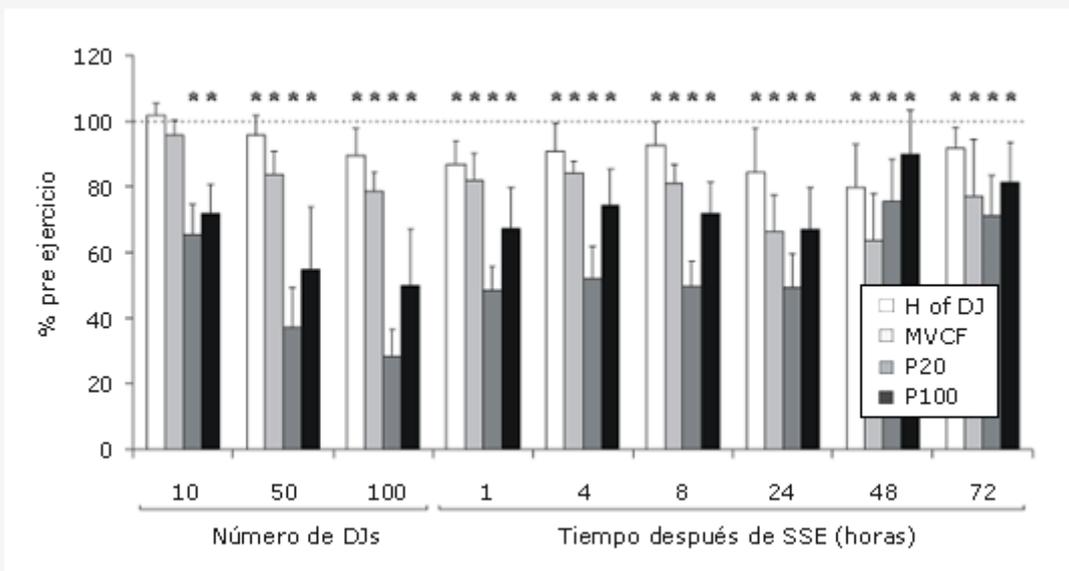


Figura 1. Curso temporal de los cambios en la altura (H) de los saltos con caída (DJs), máxima fuerza de contracción voluntaria (MVCF), fuerza muscular evocada por electroestimulación a frecuencia baja (P20) y elevada (P100) con un ángulo en la rodilla de 90 grados luego de 10, 50 y 100 DJs y 1, 4, 8, 24, 48, y 72 horas después de SSE (promedio \pm SD). SEE - ejercicios de estiramiento-acortamiento (100 saltos con caída realizados desde 0.5 metros con un contra-movimiento con un ángulo de flexión de rodilla de 90 grados con un rebote máximo inmediato, con un intervalo de 30 segundos entre los saltos). La línea punteada indica el nivel promedio previo al ejercicio. * $p < 0.05$ comparado con los valores previos al ejercicio.

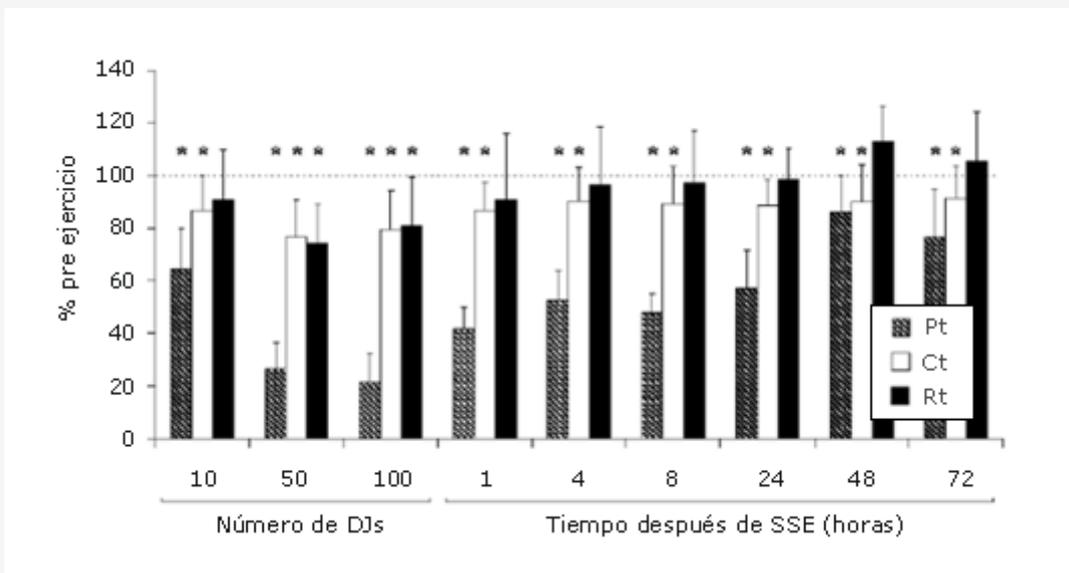


Figura 2. Curso temporal de los cambios en la fuerza de las fibras musculares (Pt), Pt tiempo de contracción (Ct), relación de la mitad del tiempo Pt (Rt) después de 10, 50 y 100 DJs y 1, 4, 8, 24, 48, 72 horas después de SSE (promedio \pm SD). SEE - ejercicios de estiramiento-acortamiento (100 saltos con caída realizados desde 0.5 metros con un contra-movimiento con un ángulo de flexión de rodilla de 90 grados con un rebote máximo inmediato, con un intervalo de 30 segundos entre los saltos). La línea punteada indica el nivel promedio previo al ejercicio. * $p < 0.05$ comparado con los valores previos al ejercicio.

Se produjeron reducciones significativas en Pt, P20 y P100, así como en el índice P20/P100 ($p < 0.05$, en comparación con los valores medidos inmediatamente después de SSE) 60 minutos después del SSE, sin embargo, los cambios en la MVCF o en la altura del DJ no fueron significativos (Figuras 1, 2 y 3). Hubo una disminución significativa en la altura del DJ y en la MVCF en las 8 a 48 horas post SSE ($p < 0.05$), mientras que no se manifestaron cambios en Pt, P20 y P100. Dentro de las 24 - 48 horas post SSE, los sujetos manifestaron un dolor muscular agudo (aproximadamente 4-5 puntos, Figura 5).

Además, la actividad de la CK en sangre se incrementó hasta aproximadamente 1300 IU/L ($p < 0.05$, en comparación con los valores pre-ejercicio; Figura 6) dentro de las 24 horas post SSE

Se halló una correlación significativa entre la disminución de la altura de los DJs y la MVCF en las 24 y 48 horas posteriores al SSE, y el dolor muscular ($r = 0.72-0.94$) y la CK ($r = -0.6-0.7$). Hubo una correlación significativa ($r = -0.31-0.39$) entre el dolor muscular y la CK a las 24-48 horas después de SSE.

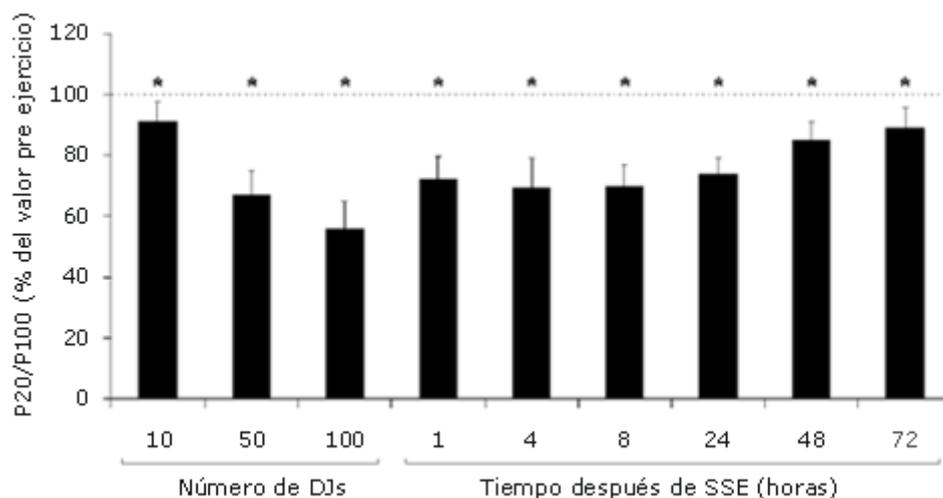


Figura 3. Curso temporal de los cambios en la relación P20/P100 luego de 10, 50 y 100 saltos con caída (DJ), así como dentro de 1, 4, 8, 24, 48 y 72 horas después de SSE (media ± DE). P20 y P100 - fuerza de contracción evocada a través de la estimulación del cuadriceps con frecuencias de 20 Hz y de 100 Hz (media ± DE). SSE- ejercicio de estiramiento-acortamiento (100 DJs con un intervalo de 30 segundos entre los saltos) La línea punteada indica el nivel promedio previo al ejercicio. * $p < 0.05$ comparado con los valores previos al ejercicio.

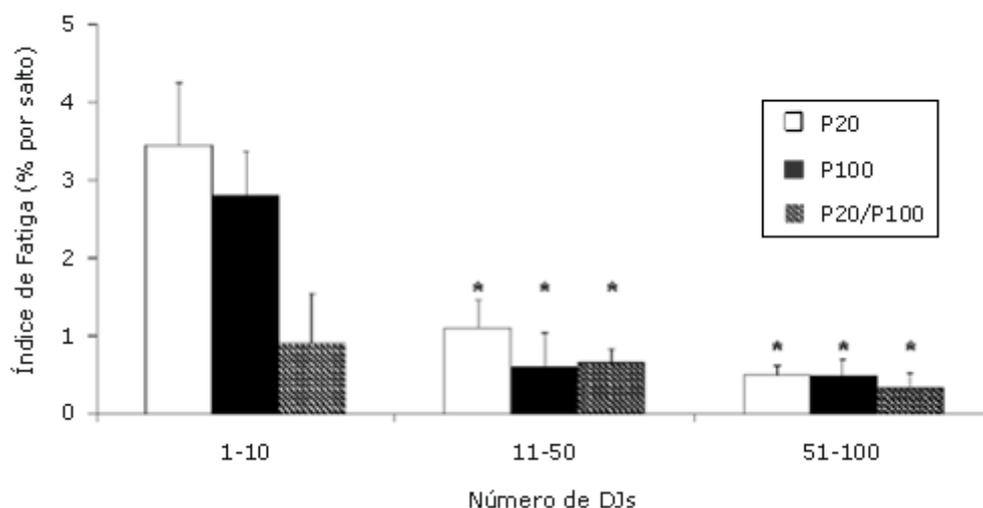


Figura 4. El índice de fatiga por salto de P20, P100 y de la relación P20/P100 durante SEE (media ± DE). P20 y P100 - fuerza de contracción evocada a través de la estimulación del cuadriceps con frecuencias de 20 Hz y de 100 Hz (media ± DE). SSE- ejercicio de estiramiento-acortamiento (100 saltos con caída realizados desde 0.5 metros con un contra-movimiento con un ángulo de flexión de rodilla de 90 grados con un rebote máximo inmediato, con un intervalo de 30 segundos entre los saltos). * $p < 0.05$ comparado con los

DISCUSION

Según nuestro conocimiento, este es el primer estudio que investiga las diferencias en el curso temporal del rendimiento del VEP y del EEP en seres humanos tanto durante (luego de 10, 50 y 100 DJs) como después (1, 4, 8, 24, 48, y 72 horas post al ejercicio) de haber realizado ejercicios de estiramiento-acortamiento (saltos con caída). Por lo general, los resultados de los estudios muestran que el curso temporal de la función muscular durante y después de SSE es significativamente dependiente de: 1) el carácter específico de la activación muscular (voluntaria vs. eléctrica); 2) tipo de contracción muscular voluntaria (isométrica vs. estiramiento-acortamiento) y 3) frecuencias de estimulación muscular (frecuencia de estimulación baja vs. elevada).

Entre los hallazgos más interesantes y destacados de este estudio se debería mencionar: a) que la fuerza muscular evocada eléctricamente durante el SSE disminuye significativamente más que la fuerza voluntaria (altura del los DJs y MVCF); b) al comienzo del ejercicio (después de 10 DJs) Pt, P20 y P100 cambiaron significativamente más que durante la segunda parte del SSE (en particular con estimulación de baja frecuencia); c) el SSE y la MVCF disminuyeron significativamente más que la altura del DJ; d) hubo un incremento significativo de la Pt, P20 y P100 entre las 8 y 24 horas posteriores al SSE, mientras que la altura del DJ, así como la MVCF disminuyeron de manera significativa; f) la disminución significativa en la altura del DJ así como la MVCF tuvieron una correlación significativa con el dolor muscular dentro de las 24-48 horas posteriores a SSE.

Las principales Causas de los Cambios en el VEP y en el EEP durante y después del SSE están Relacionadas con el Daño Muscular Inducido por el Ejercicio

Los cambios en el rendimiento muscular evocado tanto voluntaria como eléctricamente durante el SSE, probablemente no se deben a los cambios metabólicos que se producen en el mioplasma, como los iones de fosfato o de hidrógeno, dado que la duración del salto (0.5-0.55 segundos) fue muy pequeña para que el ATP y la PCr disminuyan de manera significativa, y además, la pausa de 30 segundos fue suficiente para restituir ATP y PCr. Por lo tanto, las causas en los cambios ocasionados en el rendimiento muscular cuando se realizan SSE se asocian a factores no-metabólicos, principalmente relacionados con el daño muscular.

Luego de realizar el SSE dentro de las 24-72 horas posteriores a la carga, se manifiestan los síntomas indirectos del daño muscular: el incremento del dolor muscular (Figura 5) y el aumento de la actividad de la CK (Figura 6), disminución prolongada del rendimiento neuromuscular (MVCF y altura del DJ) (Figura 1), así como la fuerza muscular evocada por bajas y elevadas frecuencias de electroestimulación (Figura 1). No existen dudas de que sin importar cuales sean las principales razones para la disminución en VEP y en EEP, están relacionadas con el daño en las estructuras que producen fuerza (Clarkson y Hubal, 2002, Warren et al., 2001) y con el sistema de acoplamiento excitación-contracción (Prasartwuth et al., 2005; Warren et al., 2002). Un trabajo reciente de Byrne y Eston (2002) demostró que la recuperación de la fuerza de un músculo extensor de la rodilla, estaba incompleta 7 días después de haber realizado 100 repeticiones de la fase excéntrica de la sentadilla, con una carga del 80% de una repetición máxima concéntrica. Ellos determinaron que hubo una disminución del 5-10% en la altura del DJ luego de realizar ejercicio y la actividad de la CK fue similar a la que nosotros registramos.

Por lo tanto, es bastante inesperado que en los 60 minutos posteriores al SSE ocurran cambios significativos en la fuerza muscular evocada con frecuencias de estimulación elevadas y bajas (Figura 1). Si debido al daño muscular, se manifiesta una ruptura del sarcómero (Proske y Allen, 2005), consecuentemente, la ruptura del sarcómero no se regenerará dentro de las 4 - 8 horas (Proske y Allen, 2005). Por lo tanto, se debe suponer que dentro de los 60 minutos posteriores al SSE, no se puede asociar un incremento en el EEP con la regeneración de sarcómeros.

La Reducción Secundaria se Manifestó en el VEP

Los resultados de nuestra investigación muestran que hubo un incremento significativo en EEP desde el final del SSE hasta las 48 horas, mientras que el VEP secundario, disminuyó de manera significativa (Figura 1). Esto concuerda con las investigaciones realizadas por otros científicos quienes hallaron que, incluso en los ejercicios que generen daño muscular, en lugar de restaurar el músculo hacia sus niveles iniciales, se produce una disminución en el rendimiento neuromuscular (Faulkner et al., 1993; Horita et al., 2003; Komi, 2000). Información reciente muestra que la mayoría de los casos, la pérdida temprana de fuerza, se debe a una falla en el proceso de acoplamiento excitación-contracción y a una pérdida lenta

de las proteínas contráctiles durante los días que tarda en recuperarse el daño (Warren et al. 2002). Ingalls et al. (1998) encontraron que la disminución en la fuerza muscular en ratones durante los tres primeros días luego de EIMD no se asocia con la disminución en la cantidad de proteínas contráctiles, dado que la degradación proteica comienza dos días después. Además con el comienzo de la degradación de proteínas, comienza la recuperación de la fuerza muscular. Esto indica que no coinciden los cursos temporales de la degradación de proteínas contráctiles y el de la función muscular. Los científicos aún deben aclarar si la gran disminución de la fuerza muscular se debe a un fallo en el acoplamiento excitación-contracción o a un daño en los sarcómeros.

Dado que, después de realizar ejercicio que genere daño muscular, los músculos se someten a un proceso que, sin lugar a dudas, deberían adelantarse a la disminución en MVCF nosotros suponemos que, tanto en el caso con MVCF y la altura de salto del DJ, debería haber también una disminución en la fuerza evocada por cualquier frecuencia de estimulación durante la recuperación después de SSE. Sin embargo, en nuestro experimento, no hubo manifestaciones de disminución secundaria en la fuerza evocada por estimulación de baja y elevada frecuencia (figura 1). Esto claramente muestra que los cambios en VEP y en EEP son diferentes durante la recuperación después de haber realizado SSE.

El Curso Temporal del Rendimiento Muscular Evocado Voluntariamente Durante y Después de SSE, Depende del Tipo De Contracción Muscular

Los resultados de nuestro estudio indican que SSE afectó más significativamente el rendimiento del ciclo estiramiento-acortamiento (altura del DJ) que MVCF (Figura 1). Esto concuerda con los resultados de la investigación realizado por Byrne y Eston (2002) quienes hallaron que los daños de la función muscular se atenuaban cuando el ciclo estiramiento-acortamiento se utilizaba en saltos verticales (Byrne y Eston, 2002). Se ha demostrado que la fatiga del sistema neuromuscular inducida por ejercicios de estiramiento-acortamiento, no puede ser atribuida sólo al daño muscular, dado que puede ser causada además por diferencias en la relación entre la modulación del reflejo y la rigidez, así como la compensación por el comando motor central (Komi, 2000). Sin embargo, Horita et al. (2003), concluyó que las contracciones concéntricas, (salto desde sentadilla), parecen no afectar el posible comienzo retrasado del daño muscular, como sí se produce en el salto con caída (DJ). Ellos especularon que esta única respuesta, se puede explicar a través de la importancia de la estructura muscular en actividades SSC y diferentes comandos motores y/o estrategias de control entre SSC y las acciones musculares concéntricas.

Los resultados de Harrison y Gaffney (2004) indican que los SSE afectaron de manera significativa el rendimiento del ciclo estiramiento-acortamiento, esto se explica con una mayor reducción en el rendimiento del salto desde sentadilla en relación con el rendimiento en el DJ. Concluyeron, que el daño muscular además incrementó significativamente la rigidez en la pierna, lo cual indica que los cambios en la rigidez pueden ser una importante adaptación resultante del ejercicio excéntrico. Las opiniones presentadas anteriormente, muestran que no existen una conclusión generalizada en relación a: de qué forma afecta EIMD el rendimiento muscular evocado voluntariamente en función del tipo de contracción; a pesar de que los datos reflejados en nuestra investigación, muestran que el curso temporal del rendimiento muscular evocado voluntariamente, depende del tipo de contracción. A pesar de la aceptación general del hecho de que el dolor muscular puede influenciar en la efectividad del control motor, aún no está clara la relación con el rendimiento neuromuscular.

El Curso Temporal del Rendimiento Muscular Evocado Eléctricamente Durante y Después del SSE Depende de la Frecuencia de Estimulación Muscular

Los resultados de nuestra investigación muestran que con una estimulación de P20 y de Pt durante el SSE y a lo largo de las 72 horas posteriores, el SSE disminuye en mayor medida que cuando se lo estimula con P100 (Figuras 1 y 2). Esto indica que se sometió a los músculos a LFF que duró 72 horas después del SSE (Figura 3). Otros científicos, al igual que nosotros, observaron que la LFF no se recuperó luego de la aplicación de la carga hasta pasadas por lo menos 24-72 horas (Westerblad y Allen, 2002). La LFF se caracteriza por una pérdida de fuerza relativa cuando se lo estimula a baja frecuencia, y es importante mencionar que la fuerza no tiene problemas o que existen pocos problemas en cuanto a la fuerza, cuando se lo estimula con frecuencias elevadas (Jones, 1996; Ratkevicius et al., 1998; Rijkelijhuizen et al., 2005; Westerblad y Allen, 2002). En nuestro caso, hubo una disminución de la fuerza evocada, no sólo con baja frecuencia de estimulación (20 Hz) sino también con elevadas frecuencias (100 Hz) (Figura 1). Sin embargo, es raro encontrar una carga capaz de generar una disminución en la fuerza evocada por estimulación de baja frecuencia dado que, en la mayoría de los casos existe también una disminución de mayor o menor magnitud en la fuerza evocada a través de estimulación de alta frecuencia (Martin et al., 2004; Ratkevicius et al., 1998; Strojnik y Komi, 1998).

Aunque no se conozcan los mecanismos subyacentes, se ha sugerido que, la acumulación de metabolitos y la elevación de la concentración de Ca^{2+} intracelular, así como el daño mecánico del músculo, juegan un rol importante en el desarrollo de LFF (Westerblad y Allen, 2002). Se podría pensar que en nuestro caso, la manifestación de LFF (Figura 3) indica la falla del sistema de acoplamiento excitación-contracción, dado que se ha determinado que uno de los mecanismos del LFF depende de la menor liberación del Ca^{2+} desde el retículo sarcoplásmico (Westerblad y Allen, 2002). Además, la

disminución del Ct y Rt durante y después de SSE (Figura 2) confirma de manera indirecta, que se ha producido una menor liberación del Ca^{2+} desde el retículo sarcoplásmico.

Los resultados de nuestra investigación, realizada en seres humanos, concuerdan con la información de otros científicos quienes sostienen que se produce una disminución significativa en la función muscular de ranas, ratones y ratas, incluso después de 1-10 contracciones excéntricas (Brooks et al., 1995; Macpherson et al., 1996; Patel et al., 2004; Yeung et al., 2003). Se ha propuesto que durante una serie de contracciones excéntricas, más y más sarcómeros sufrirán un sobre-estiramiento, comenzando con los más débiles e incluyendo de manera progresiva a los sarcómeros más fuertes (Proske y Allen, 2005). Esta parece ser la razón principal por la cual se produjo una mayor disminución en la fuerza muscular evocada con electroestimulación luego de los primeros 10 Djs que entre el salto 50 y 100.

¿Existe Una Correlación Entre los Síntomas Indirectos del EIMD?

Hemos determinado por un lado, que existe una correlación significativa entre la disminución de la altura del DJ y el MVCF en las 24 y 48 horas posteriores al SSE, y por otro lado hemos determinado una correlación entre el dolor muscular y la CK. En otras palabras se podría pensar que, a mayor dolor muscular, mayor disminución en la altura del DJ y MVCF, sin embargo, aunque pueda parecer extraño, a mayor disminución de la altura del DJ y de MVCF, menor es el incremento de CK en la sangre.

Hubo una correlación negativa y no significativa, entre el dolor muscular y la CK en las 24-48 horas posteriores al SSE. Esto parece indicar que dos síntomas indirectos del daño muscular, por ejemplo, CK y dolor muscular, posiblemente no estén relacionados funcionalmente. Creemos que el dolor muscular es un indicativo de inflamación, mientras que el incremento en CK parece estar más asociado al daño muscular. Esto lo confirma el hallazgo de MacIntyre et al. (2001) quien encontró que el dolor muscular estaba asociado con la inflamación y no con el daño del músculo.

Algunos autores ya han observado que tanto la actividad de la CK en la sangre (Friden y Lieber, 2001) como el comienzo retrasado del dolor muscular (Nosaka et al., 2002), no son eficaces para predecir la función muscular después de haberse producido un daño en el músculo.

Aún hoy existen publicaciones que afirman que una recuperación retrasada de la respuesta de la fuerza muscular, está relacionada con cambios en la CK (Nicol et al., 2003). Por lo tanto, sin lugar a dudas, los científicos tendrán que encontrar una manera más clara de comprender el proceso de inflamación, los daños que se producen en el sistema contráctil y/o de activación del músculo y el dolor muscular. Se puede considerar que existe una fuerte relación entre el dolor muscular dentro de las 24-48 horas posteriores al SSE y la disminución en el rendimiento neuromuscular (altura del DJ y MVCF), esto se puede explicar a través de que, debido al dolor muscular que fue transferido por las señales inhibitorias a partir de los aferentes III y IV, pudo ocurrir un deterioro en la eficacia de la conducción motora central

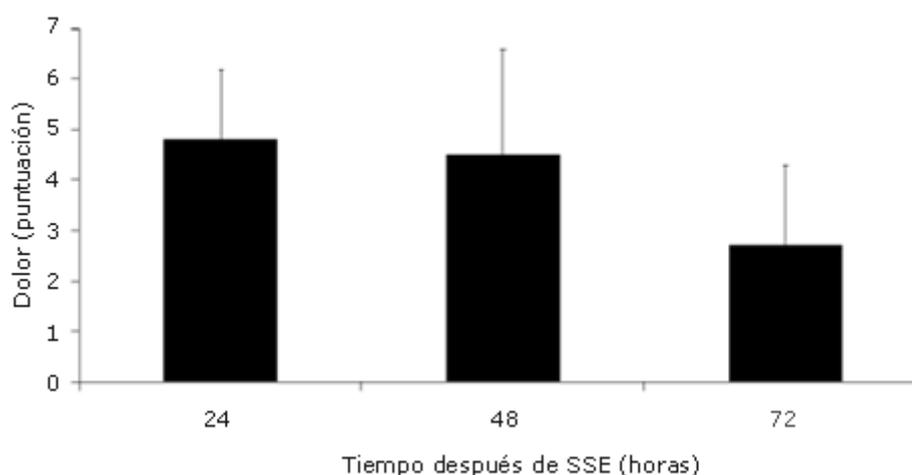


Figura 5. Dolor muscular 24, 48 y 72 horas después de SSE Hz (media \pm DE). SSE- ejercicio de estiramiento-acortamiento (100 saltos con caída realizados desde 0.5 metros con un contra-movimiento con un ángulo de flexión de rodilla de 90 grados con un rebote

máximo inmediato, con un intervalo de 30 segundos entre los saltos).

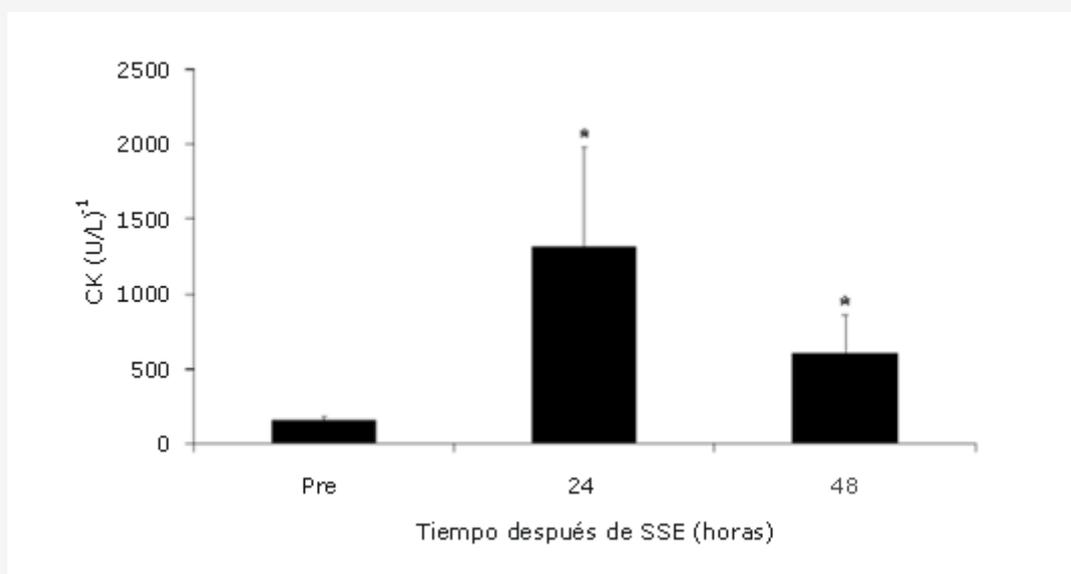


Figura 6. Curso temporal los cambios en la actividad de la CK en las 24, 48 y 72 horas posteriores al SSE (media \pm DE). SSE- ejercicio de estiramiento-acortamiento (100 saltos con caída realizados desde 0.5 metros con un contra-movimiento con un ángulo de flexión de rodilla de 90 grados con un rebote máximo inmediato, con un intervalo de 30 segundos entre los saltos). * $p < 0.05$ comparado con los valores previos al ejercicio.

CONCLUSION

En conclusión, las diferencias en el curso temporal del VEP y del EEP son más notorias al comienzo del SSE, cuando el VEP no se modifica y el EEP disminuye y dentro de las 8-48 horas posteriores al SSE, cuando el VEP disminuye y el EEP se incrementa. La disminución secundaria del VEP dentro de las 24-48 horas tuvo una correlación significativa con el dolor muscular. Por lo tanto, en la estimación de la función muscular durante ejercicio de estiramiento-acortamiento, se deben tomar en cuenta el tipo de activación y de contracción muscular y las frecuencias de estimulación.

PUNTOS CLAVE

No hubo cambios en el rendimiento muscular evocado voluntariamente, mientras que el rendimiento evocado eléctricamente manifestó una disminución significativa durante los primeros 10 saltos con caída.

Hubo un incremento significativo en el rendimiento muscular evocado eléctricamente desde las 8 a 48 horas posteriores a los 100 saltos con caída, mientras que la fuerza de contracción voluntaria disminuyó significativamente.

La disminución secundaria en la altura del salto con caída, así como la máxima fuerza de contracción voluntaria correlacionaron significativamente con el dolor muscular dentro de las 24-48 horas posteriores al ejercicio.

REFERENCIAS

1. Bosco, C., Viitasalo, J.T., Komi, P.V. and Luhtanen, P (1982). Combined effect of elastic energy and myoelectric potentiation during stretch-shortening cycle exercise. *Acta Physiologica Scandinavica* 114, 557-565
2. Brooks, S.V., Zerba, E. and Faulkner, J.A (1995). Injury to muscle fibres after single stretches of passive and maximally stimulated muscles in mice. *The Journal of Physiology* 488, 459-469
3. Butterfield, T.A. and Herzog, W (2005). Quantification of muscle fiber strain during in-vivo repetitive stretch-shortening cycles. *Journal of Applied Physiology* 99, 593-602
4. Byrne, C. and Eston, R (2002). The effect of exercise-induced muscle damage on isometric and dynamic knee extensor strength and vertical jump performance. *Journal of Sports Science* 20, 417-425
5. Byrne, C., Twist, C. and Eston, R (2004). Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage. Theoretical and Applied Implications. *The Journal of Sports Medicine* 1, 49-69
6. Clarkson, P.M. and Hubal, M.J (2002). Exercise-induced muscle damage in humans. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 881, 52-69
7. Faulkner, J.A., Brooks, S.V. and Opitck, J.A (1993). Injury to skeletal muscle fibres during contractions: conditions of occurrence and prevention. *Physical Therapy* 73, 911-921
8. Friden, J. and Lieber, R.L (2001). Serum creatine kinase level is a poor predictor of muscle function after injury. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 11, 126-127
9. Harrison, A.J. and Gaffney, S.D (2004). Effects of muscle damage on stretch-shortening cycle function and muscle stiffness control. *Journal of Muscle Research and Cell Motility* 18, 771-776
10. Ingalls, C.P., Warren, G.L. and Armstrong, R.B (1998). Dissociation of force production from MHC and actin contents in muscles injured by eccentric contractions. *Journal of Muscle Research and Cell Motility* 119, 215-224
11. Jones, D.A (1996). High-and low-frequency fatigue revisited. *Acta Physiologica Scandinavica* 153, 265-270
12. Komi, P.V (2000). Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics* 33, 1197-1206
13. Le Pera, D., Graven-Nielsen, T., Valeriani, M., Oliviero, A., Di Lazzaro, V., Tonali, P.A. and Arendt-Nielsen, L (2001). Inhibition of motor system excitability at cortical and spinal level by tonic muscle pain. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 112, 1633-1641
14. Lieber, R.L. and Friden, J (2002). Mechanisms of muscle injury gleaned from animal models. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 881, 70-79
15. MacIntyre, D.L., Soricter, S., Mair, J., Berg, A. and McKenzie, D.C (2001). Markers of inflammation and myofibrillar proteins following eccentric exercise in humans. *European Journal of Applied Physiology* 84, 180-186
16. Macpherson, P.C., Schork, M.A. and Faulkner, J.A (1996). Contraction-induced injury to single fiber segments from fast and slow muscles of rats by single stretches. *American Journal of Physiology. Cell Physiology* 271, C1438-1446
17. Martin, V., Millet, G.Y., Martin, A., Deley, G. and Lattier G (2004). Assessment of low-frequency fatigue with two methods of electrical stimulation. *Journal of Applied Physiology* 97, 1923-1929
18. Nosaka, K. and Clarkson, P.M (1996). Changes in indicators of inflammation after eccentric exercise of the elbow flexors. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 228, 953-961
19. Nosaka, K., Newton, M. and Sacco, P (2002). Delayed-onset muscle soreness does not reflect the magnitude of eccentric-induced muscle damage. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 12, 337-346
20. Patel, T.J., Das, R., Friden, J., Lutz, G.J. and Lieber, R.L (2004). Sarcomere strain and heterogeneity correlate with injury to frog skeletal muscle fiber bundles. *Journal of Applied Physiology* 97, 1803-1813
21. Prasartwuth, O., Taylor, J.L. and Gandevia, S.C (2005). Maximal force, voluntary activation and muscle soreness after eccentric damage to human elbow flexor muscles. *The Journal of Physiology* 11, 337-348
22. Proske, U. and Allen, T.J (2005). Damage to skeletal muscle from eccentric exercise. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 333, 98-104
23. Ratkevicius, A., Skurvydas, A., Pavilionis, E., Quistorf, B. and Lexell J (1998). Effects of contraction duration on low-frequency fatigue in voluntary and electrically induced exercise of quadriceps muscle in humans. *European Journal of Applied Physiology* 77, 462-468
24. Rijkelijhuizen, J.M., de Ruiten, C.J., Huijijng, P.A. and de Haan, A (2005). Low-frequency fatigue, post-tetanic potentiation and their interaction at different muscle lengths following eccentric exercise. *The Journal of Experimental Biology* 2208, 55-63
25. Skurvydas, A., Streckis, V., Mickeviciene, D., Kamandulis, S., Stanislovaitis, A. and Mamkus, G (2006). Effect of age on metabolic fatigue and on indirect symptoms of skeletal muscle damage after stretch-shortening exercise. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 46, 431-441
26. Skurvydas, A. and Zahovajevs P (1998). Is post-tetanic potentiation, low frequency fatigue (LFF) and post-contraction depression (PCD) coexistent in intermittent isometric exercises of maximal intensity?. *Acta Physiologica Scandinavica* 164, 127-133
27. Strojnik, V. and Komi, P.V (1998). Neuromuscular fatigue after maximal stretch-shortening cycle exercise. *Journal of Applied Physiology* 84, 344-350
28. Warren, G.L., Ingalls, C.P., Lowe, D.A. and Armstrong, R.B (2001). Excitation-contraction uncoupling: major role in contraction-induced muscle injury. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 229, 82-87
29. Warren, G.L., Ingalls, C.P., Lowe, D.A. and Armstrong, R.B (2002). What mechanisms contribute to the strength loss that occurs during and in the recovery from skeletal muscle injury?. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 332, 58-64
30. Warren, G.L., Lowe, D.A. and Armstrong, R.B (1999). Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury.

Sports Medicine 27, 43-59

31. Westerblad, H. and Allen, D.G (2002). Recent advances in the understanding of skeletal muscle fatigue. *Current Opinion in Rheumatology* 14, 648-625
32. Yeung, E.W., Ballard, H.J., Bourreau, J.P. and Allen, D.G (2003). Intracellular sodium in mammalian muscle fibers after eccentric contractions. *Journal of Applied Physiology* 94, 2475-2482

Cita Original

Albertas Skurvydas, Gediminas Mamkus, Vilma Dudonienė, Sigitas Kamandulis, Dalia Mickeviciene, Nerijus Masiulis, Aleksas Stanislovaitis and Vytautas Streckis. The Time-Course Of Voluntary And Electrically Evoked Muscle Performance During And After Stretch-Shortening Exercise Is Different. *Journal of Sports Science and Medicine* (2007) 6, 408- 416.