

Monograph

Fuerza y Daño Muscular Luego de Dos Modos de Entrenamiento con Sobrecarga Variable

Saied Jalal Aboodarda¹, John George², Abdul Halim Mokhtar³ y Martin Thompson⁴¹*Sports Center, Faculty of Medicine, University of Malaya, Malaysia.*²*Department of Biomedical Imaging, Faculty of Medicine, University of Malaya, Malaysia.*³*Sports Medicine Unit, Faculty of Medicine, University of Malaya, Malaysia.*⁴*Faculty of Health Sciences, Discipline of Exercise & Sport Science, The University of Sydney, Australia.*

RESUMEN

El entrenamiento con Máquinas Nautilus (NM) y con Resistencia Elástica (ER) ha ganado considerable popularidad entre atletas y pesistas recreacionales que buscan incrementar su fuerza muscular. Sin embargo, existe cierta controversia acerca de la utilización de ER para incrementar la fuerza y la hipertrofia muscular en individuos saludables y entrenados. El propósito del presente estudio fue comparar el efecto de contracciones cuasi máximas repetidas utilizando ER/NM sobre los indicadores de daño muscular, incluyendo: reducción en la fuerza máxima (MVIC), inflamación muscular (DOMS), concentración plasmática de creatina quinasa (CK) e incremento en la señal alta muscular en imágenes ponderadas T2 utilizando imágenes de resonancia magnética (MRI). Nueve hombres saludables completaron dos modalidades de ejercicio (5 series × 10 RM ER/NM) utilizando un diseño cruzado y contrabalanceado con un período de "lavado" de tres semanas entre los experimentos. Se midió la MVIC y se clasificó y registró el DOMS durante 4 días consecutivos a la vez que se recolectaron muestras de sangre en los días 1, 3, 5 y 7. Previamente y 48 hs luego de que los sujetos completaran cada modo de ejercicio, se llevaron a cabo los registros de MRI. Las fuerzas promedio aplicadas mostraron un valor significativamente mayor NM en comparación con ER (362 ± 34.2 N vs 266.73 ± 44.6 N respectivamente) a través de las 5 series de ejercicio dinámico ($p < 0.05$, para todas las comparaciones). Sin embargo, los indicadores del daño muscular (tiempo de relajación T2, DOMS, MVIC y CK sérica) exhibieron una respuesta muy similar entre los modos de entrenamiento. La concentración plasmática de CK se incrementó significativamente luego de ambos modos de entrenamiento, con un valor pico al Día 3 ($p < 0.05$). La inflamación muscular alcanzó un nivel significativo luego de ambos modos de ejercicio y mostró un valor pico al segundo día ($p < 0.05$). El tiempo de relajación T2 demostró un incremento significativo luego del ejercicio ER y NM en comparación con el valor pre-intervención ($p < 0.05$). La similitud de estas respuestas luego de ambas formas de entrenamiento (ER y NM) sugiere que ambos modos proveen un estrés de entrenamiento similar a pesar de la generación de fuerza considerablemente menor durante el ejercicio ER. La importancia de estos hallazgos se asocia con el hecho de que se ha demostrado que el daño muscular inducido por el ejercicio parece ser el mecanismo subyacente de la hipertrofia muscular.

Palabras Clave: entrenamiento con resistencias elásticas, imágenes de resonancia magnética, sobrecarga muscular, hipertrofia muscular

INTRODUCCIÓN

Está suficientemente documentado que las contracciones excéntricas repetidas o la sobrecarga de músculos no habituados a ella, provocará inflamación muscular, la reducción transitoria de la función muscular y el incremento de la fuga de proteínas intracelulares hacia el espacio vascular (Clarkson and Hubal, 2002; Howatson and van Someren, 2008; Smith, 1991). Observaciones realizadas con microscopía de electrones han mostrado ruptura de los miofilamentos, de las líneas Z y disrupción focal, mientras que los análisis de orina sugieren daño del tejido conectivo. Diversos estudios han investigado el daño muscular luego de la repetición de contracciones excéntricas y/o la realización de series de ejercicio en músculos no habituados (Clarkson and Hubal, 2002; Eston et al., 2003; Linnamo et al., 2000; Newham et al., 1983). Sin embargo, hasta la fecha no parece haber estudios acerca de este fenómeno luego de la realización de series de Entrenamiento con Sobrecarga Externa Variable (VRT) tal como las Maquinas CAM-Nutilus (NM) (Nautilus, Vancouver, WA) o la Resistencia Elástica (ER) (Hygenic Corporation, Akron, Ohio).

El ejercicio en NM y con ER ha ganado considerable popularidad entre atletas y pesistas recreacionales que buscan incrementar su fuerza muscular (Graves et al., 1989; Manning et al., 1990; Page and Ellenbecker, 2003; Wallace et al., 2006). Esto se debe, en parte, al hecho de que los dispositivos VRT proveen resistencia externa variable en base a la capacidad de generar fuerza muscular a lo largo del rango de movimiento (Israetel et al., 2010; Manning et al., 1990). El ejercicio con ER utiliza bandas elásticas que requieren que la producción de fuerza muscular se extienda a la longitud de la banda elástica. Este es un modo efectivo y poco costoso de entrenamiento que puede ser utilizado en centros terapéuticos y de rehabilitación (Hintermeister, et al., 1998; Page, et al., 1993). A pesar de la popularidad del ER, existe cierta controversia respecto de la utilización de este modo de ejercicio para incrementar la hipertrofia y la fuerza muscular entre individuos saludables y entrenados. Esto se basa en la infundada presunción de que “un dispositivo elástico provee un bajo nivel de fuerza externa” (Ebben and Jensen, 2002; Hodges, 2006; Newsam et al., 2005; Treiber et al., 1998) y por lo tanto su utilización es limitada para proveer un estímulo adecuado para el desarrollo de la fuerza. Los dispositivos a base de resistencias elásticas fueron originalmente comercializados como ayudas terapéuticas de bajo costo para la rehabilitación muscular, en donde la utilización de bajas resistencias es la norma. En refuerzo a la presunción de que los dispositivos que utilizan resistencias elásticas proveen bajas resistencias, Hughes (1999) reportó que la resistencia de un dispositivo ER oscilaba entre 3.3 N (amarillo) y 70.1 N (plateada) cuando los materiales elásticos estaban a un 18% (mínimo) y un 159% (máximo) de deformación a partir de la longitud de reposo (sin estirar).

Para incrementar la magnitud de la fuerza elástica se han recomendado dos estrategias en la literatura científica; la primera tiene que ver con reducir la longitud inicial del dispositivo elástico (Page and Ellenbecker, 2003) y la segunda está relacionada con duplicar o triplicar el número de unidades elásticas (Hodges, 2006; Simoneau et al., 2001). Estas estrategias tienen el potencial de incrementar adicionalmente la utilidad de los dispositivos ER al permitir incrementos significativos en la resistencia. De esta manera, los dispositivos ER, que con frecuencia son utilizados como ayuda en la terapia física, podrían adaptarse para provocar ganancias significativas en la fuerza con un programa en el que se incluyan contracciones cuasi máximas repetidas. Sin embargo, la tasa de contracción es variable y la resistencia es variable a través del rango de movimiento, resultando en un reclutamiento complejo de las unidades motoras (grado de sincronización). Por ejemplo, la capacidad de los extensores de la rodilla para generar fuerza puede verse comprometida por la activación de los músculos antagonistas (bíceps femoral) en una estrategia de reclutamiento que contribuya efectivamente a la estabilización de la articulación de la rodilla (Carolan and Cafarelli, 1992). Sin embargo, no es claro si se puede alcanzar una fuerza de contracción verdaderamente máxima al reducir la longitud inicial de un dispositivo elástico o utilizando bandas elásticas adicionales. Claramente, si se produce la co-activación con alguna de estas estrategias, entonces no se alcanzará una verdadera fuerza máxima de contracción. Además, la combinación de co-activación, resistencia externa variable y la dificultad para controlar la velocidad de las contracciones puede resultar en que las fibras musculares activadas sean estiradas provocando así un posible daño ultra-estructural de las miofibrillas. Por lo tanto, las series repetidas de contracciones con ER tienen el potencial de inducir daño muscular, fatiga y dolor muscular de inicio retrasado (*Delayed Onset of Muscle Soreness*, DOMS). Tampoco es claro si un protocolo de series repetidas de alta intensidad en NM provocará una sobrecarga muscular similar, aunque la velocidad de movimiento (extensión de rodillas) y la estabilidad de la articulación posiblemente están más controladas. Hasta el momento desconocemos de investigaciones que hayan reportado observaciones comparativas entre ER y NM en cuanto a: (i) fuerza máxima de contracción, (ii) fatiga durante la realización de contracciones repetidas contra grandes resistencias y (iii) dolor muscular retrasado. Además, no es claro si se pueden alcanzar fuerzas de contracción similares con la utilización de ER en comparación con la utilización de NM. Sin embargo, si se pudieran alcanzar fuerzas similares con un dispositivo ER entonces estos dispositivos podrían ser utilizados como un sustituto efectivo y de bajo costo para entrenar la fuerza (Page and Ellenbecker, 2003).

Por lo tanto, nuestras hipótesis fueron: (i) que se alcanzarían fuerzas de contracción similares tanto con dispositivos ER que con NM si se reduce la longitud inicial del dispositivo elástico y utilizando bandas elásticas adicionales en paralelo; (ii) se producirá una declinación de magnitud similar en la producción de fuerza contráctil tanto con ER como con NM luego

de una única sesión de series repetidas con sobrecarga variable y (iii) se observará daño muscular y DOMS de similar magnitud luego de una única sesión de entrenamiento con series repetidas utilizando ER versus NM. Por lo tanto, se propone que la utilización de un dispositivo ER derivará en similares mediciones de la fuerza, fatigabilidad y sobrecarga que la utilización de una NM. Esto es de particular interés ya que se ha mostrado que el daño muscular luego del entrenamiento con sobrecarga inicia al proceso de regeneración fibrilar, lo cual culmina en una mayor hipertrofia (Eston et al., 2003; Flann et al., 2011; Howatson and van Someren, 2008).

MÉTODOS

Sujetos

Nueve hombres saludables universitarios (media \pm DE; 21.1 \pm 6.2 años, 74.6 \pm 7.2 kg, 1.72 \pm 0.06 m) dieron su consentimiento informado para participar en este estudio. Ninguno de los sujetos consumía medicamentos en forma regular o tenía historia de experimentar lesiones músculo-esqueléticas o enfermedades metabólicas. Además, los sujetos no habían participado en un programa de entrenamiento con sobrecarga o en deportes competitivos en los últimos 12 meses. Este estudio fue aprobado por el Comité de Ética del Centro de Deportes de la Universidad de Malaya.

Diseño Experimental

El protocolo experimental tuvo un diseño cruzado y contrabalanceado en el cual todos los sujetos completaron dos modalidades de sobrecarga para el ejercicio de extensiones de rodilla con un período de "lavado" de tres semanas entre los experimentos. Los participantes asistieron a una sesión previa al estudio en donde fueron informados acerca de los posibles riesgos y molestias asociados con los protocolos de evaluación. Posteriormente los sujetos fueron familiarizados con los procedimientos de evaluación realizando 10 repeticiones máximas (RM) del ejercicio de extensiones de rodilla en las dos modalidades de entrenamiento. La carga externa en cada modo de ejercicio se incrementó o redujo para permitir que los sujetos completaran 10 RM con el máximo esfuerzo y fallaran al intentar completar una repetición extra. Para el dispositivo ER, esto se llevó a cabo utilizando diferentes combinaciones de bandas elásticas coloreadas. Las bandas elásticas comerciales son fabricadas en diferentes colores, en donde cada color denota una resistencia específica (Simoneau et al., 2001). Se registró la magnitud de la fuerza externa ejercida por cada sujeto en las 10 RM para evitar pruebas adicionales en las sesiones de evaluación. La determinación de la carga para la realización de las 10 RM fue determinada entre la primera y segunda prueba. Los coeficientes de correlación interclase (ICC) para la fuerza externa en 10 RM en NM y ER entre la sesión previa al estudio y las sesiones de evaluación fue de 0.93 y 0.85 respectivamente. La longitud del material elástico sin estirar fue determinada para cada sujeto midiendo la distancia desde el origen del dispositivo elástico (anclado a la base del sillón de la máquina Nautilus) al eje (una tobillera hecha a medida). Además, la longitud de reposo del dispositivo elástico se redujo en un 30% para proveer una fuerza de tensión adicional a lo largo de todo el ROM (Hodges, 2006).

Una semana después, 5 sujetos fueron aleatoriamente asignados a realizar 5 series de 10 RM en el ejercicio de extensiones de rodilla utilizando ER y los restantes 4 sujetos completaron el mismo protocolo de entrenamiento en la NM. Luego de un período de recuperación de tres semanas, los sujetos realizaron el mismo procedimiento de ejercicio pero en el dispositivo alternativo. El efecto de las contracciones repetidas en ER/NM fue valorado midiendo la reducción en la MVIC (Contracción Isométrica Voluntaria Máxima), la fuerza muscular en 10 RM, la percepción subjetiva de dolor muscular (DOMS), la concentración plasmática de creatina quinasa (CK) y el incremento en la señal alta muscular en imágenes T2 ponderadas comparándolas con un fantoma de control mediante imágenes de resonancia magnética (MRI). Todos los sujetos evitaron realizar cualquier tipo de entrenamiento físico durante el estudio. El tamaño de la muestra en el estudio fue estimado de acuerdo con los métodos para el cálculo de la potencia estadística recomendados por Vincent (2005) y Hopkins (1999). Si $p = 0.05$ y la potencia estadística = 0.80, entonces se requiere la participación de diez sujetos; y con un diseño transversal, la mitad realizaría el entrenamiento ER primero y la otra mitad el entrenamiento en NM.

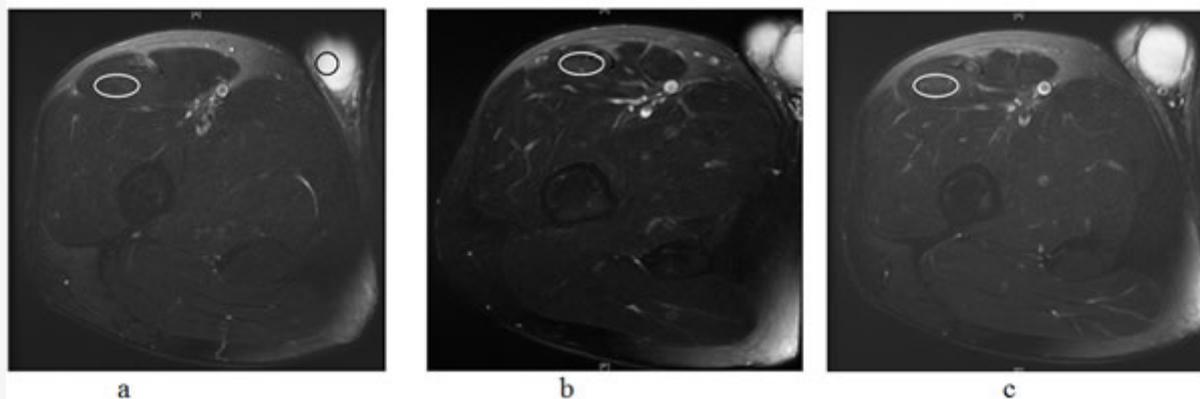


Figura 1. Muestra de las imágenes de MRI de uno de los participantes del estudio. La región de interés (óvalo blanco) se encuentra en el recto femoral en donde se midió la intensidad de la señal T2 antes del ejercicio (a), luego del ejercicio en NM (b) y luego del ejercicio con ER (c). La medición de control fue tomada en el centro del testículo adyacente (oval negro); como se muestra en la Figura 1a. El índice de las mediciones da un valor constante permitiendo la variación en los parámetros observados.

Procedimientos de Evaluación

Cada sesión experimental comenzó con la toma de imágenes de resonancia magnética del muslo no dominante seguido de la recolección de muestras sanguíneas para determinar la concentración plasmática basal de CK. La entrada en calor consistió de estiramientos estáticos y 5 minutos de ejercicio submáximo en cicloergómetro a una cadencia seleccionada por los propios sujetos. Esto estuvo seguido de la medición del valor basal de MVIC del cuádriceps de acuerdo con el método propuesto por Arendt-Nielsen y Mills (1988). El valor de la MVIC registrado fue la fuerza pico alcanzada en tres pruebas de 5 s de duración con 2 minutos de recuperación entre las pruebas.

Posteriormente los participantes realizaron 5 series de 10 RM (ER o NM) a lo largo del rango de movimiento asignado (desde 80° a 180° de extensión de rodillas) con 90 segundos de recuperación entre las series. Para minimizar las posibles influencias biomecánicas, las extensiones de rodilla en ambos modos de ejercicio se llevaron a cabo en la NM. Las 10 repeticiones fueron realizadas a una frecuencia de una repetición cada 2 segundos, y los participantes mantuvieron esta frecuencia mediante la ayuda de un metrónomo. El protocolo de entrenamiento con 10 RM es característico para desarrollar la fuerza y la hipertrofia muscular (Kraemer et al., 1991; 1998).

El brazo de palanca de la NM y el eje del dispositivo elástico fueron equipados con un transductor de fuerza (Noraxon, Scottsdale, Arizona, USA). Se utilizó el software de adquisición de datos Myoresearch-XP (Noraxon, Scottsdale, Arizona, USA) para recolectar los datos producidos por el transductor de fuerza. En base al estudio de Linnamo et al (2000b) se determinó que, para computar la magnitud de la resistencia externa en cada modo de ejercicio se utilizarían, el promedio de la 2^{da}, 3^{ra} y 4^a repetición en la primera serie, el promedio de la 1^a, 5^a y 6^a repetición de la 2^{da}, 3^{ra} y 4^a serie y el promedio de la 7^{ma}, 8^{va} y 9^{na} repetición de la quinta serie.

Luego de completar cada experimento, se midió la MVIC y los sujetos clasificaron el DOMS durante 4 días consecutivos, conjuntamente con la recolección de muestras sanguíneas en los días 1, 3, 5 y 7. El DOMS fue evaluado en base al método reportado por Takahashi et al (1994). Para esto se les pidió a los sujetos que clasifiquen subjetivamente el dolor muscular utilizando una escala de 1 (normal) a 5 (muy dolorido). La concentración plasmática de CK fue analizada espectroscópicamente utilizando un reactivo CK-NAC (Thermoelectron CORP., USA). En cada uno de los momentos de recolección de muestras sanguíneas, se recolectó una muestra de sangre venosa (5 mL) de la vena antecubital utilizando vacutainers. La sangre fue centrifugada durante 10 minutos a 1500 g para obtener la muestra de plasma. Se analizaron muestras por duplicado y la media de ambas medidas fue utilizada para los análisis estadísticos.

Previamente y cuarenta y ocho horas después de completar cada modo de ejercicio, le llevaron a cabo la toma de imágenes de resonancia magnética. Las mediciones se realizaron en una unidad MR superconductora (GE Healthcare, SIGNA 3.0T MR Systems). Las imágenes fueron tomadas desde la articulación de la cadera hasta la mitad del fémur, cubriendo el cuádriceps proximal, incluyendo la parte superior del músculo recto femoral. La secuencia de parámetros del pulso de giro-eco en las imágenes T2 ponderadas incluyó un corte de 15 mm de espesor sin interrupción, 40 cm de campo visual, matriz de 256 × 256. Los resultados de nuestro estudio piloto indicaron que la región de interés para la medición del tiempo de relajación T2 debe seleccionarse a partir de la misma porción de músculo para todas las valoraciones pre y post experimento. De acuerdo con esto, el T2 fue registrado en un área circular de 12 mm de diámetro (y 191 píxeles desde la

parte superior de la cabeza femoral) a partir del músculo recto femoral. Se tuvo cuidado de no incluir otras áreas más que la muscular, tal como arterias o grasa. Como control, también se tomaron valores de T2 de un tamaño similar, desde el centro del testículo, que siempre pudo observarse en estas imágenes del muslo superior. Por lo tanto, se calculó el índice T2 "Músculo/Testículo" para cada modo de entrenamiento y se lo comparó con el índice pre entrenamiento (Figura 1).

Análisis Estadístico

Para verificar el efecto del tiempo (intervalos pre-test y post-test) y el efecto del modo de entrenamiento (ER y NM) sobre las diferentes variables que incluyeron la MVIC pico, el DOMS y la concentración plasmática de CK, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y comparaciones post-hoc de Tukey. También se utilizaron pruebas t para muestras independientes (intra-grupo) para identificar los cambios relativos en el tiempo de relajación T2 luego de los dos modos de ejercicio. El nivel de significancia fue establecido a $p < 0.05$.

RESULTADOS

Las fuerzas promedio aplicadas a lo largo de las 5 series de ejercicio fueron significativamente mayores para el ejercicio en NM en comparación con el ejercicio con ER (362.0 ± 34.2 N vs 266.7 ± 44.6 N respectivamente) (todas las comparaciones, $p < 0.05$; Figura 2). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre ER y NM respecto de los valores pre y post test para la MVIC pico, la concentración plasmática de CK, el DOMS (Tabla 1) y el tiempo de relajación T2 (Figura 3).

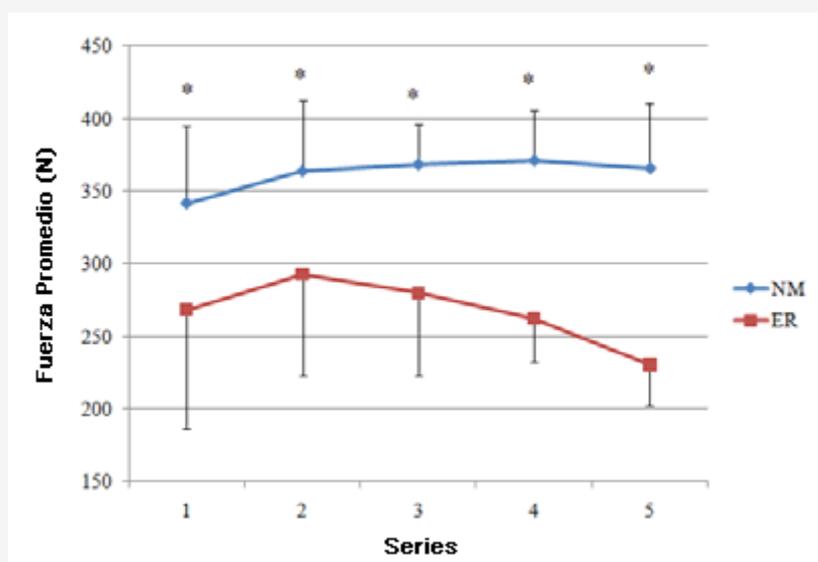


Figura 2. Fuerza externa promedio empleada durante los ejercicios dinámicos. NM = Máquina Nautilus; ER = Bandas Elásticas. *La fuerza externa fue significativamente mayor durante el NM en comparación con el ER ($p < 0.001$).

Los resultados, en relación con el curso temporal de la MVIC, el DOMS y la concentración plasmática de CK se presentan en la Tabla 1. Los datos indican que ninguno de los protocolos de entrenamiento (ER y NM) provocó una reducción significativa en la capacidad de producción de fuerza de los sujetos; aunque la Figura 2 sugiere que existe una tendencia no significativa hacia la reducción de fuerza durante el ejercicio de extensiones de rodilla con ER y entre la serie 2 y la serie 5. Luego de ambos modos de ejercicio, la concentración plasmática de CK exhibió un incremento significativo en el día 1, alcanzando el valor pico en el día 3 y permaneciendo elevada hasta el día 5 ($p < 0.05$ para todas las comparaciones). El curso temporal del dolor muscular alcanzó un nivel significativo el día posterior al ejercicio con ER y NM ($p < 0.05$), con valores pico en el día 2 y manteniéndose elevado hasta el día 3. El DOMS desapareció completamente el 4^{to} día ($p < 0.05$ para todas las comparaciones). La Figura 3 muestra una representación gráfica del tiempo de relajación T2 para la medición pre-test y con ER y NM. Los datos demostraron un incremento significativo en la intensidad de la señal del músculo recto femoral luego del ejercicio en ER y NM, en comparación con los valores pre-test ($p < 0.05$ para todas las comparaciones).

DISCUSIÓN

En relación con nuestras tres hipótesis: primero, fuimos capaces de mostrar que se puede lograr una alta sobrecarga (cuatro series de ejercicio con un promedio mayor a los 250 N) cuando se utiliza un dispositivo ER; sin embargo, la producción de fuerza promedio de cada una de las 5 series de entrenamiento ER siempre fue significativamente menor ($p < 0.05$) que la producción de fuerza en las series de entrenamiento en NM, y esto fue evidente para cada serie de ejercicio correspondiente.

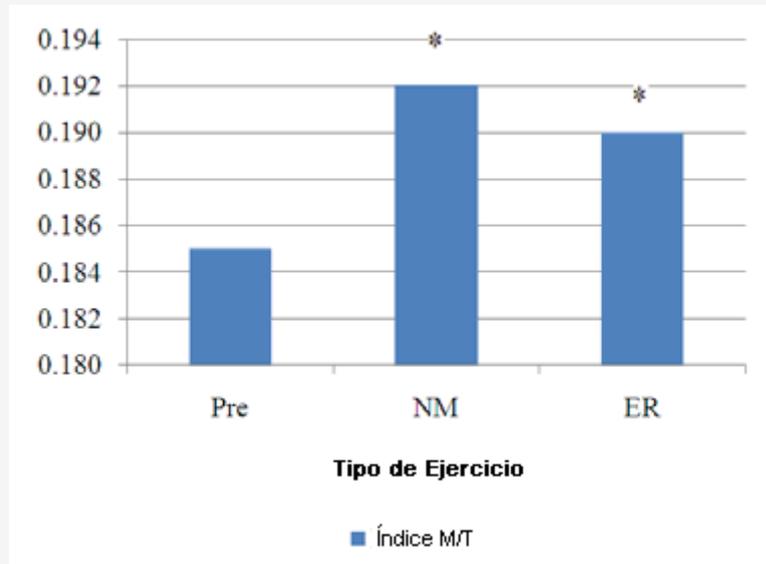


Figura 3. Tiempo de relajación T2 pre-ejercicio y después del ejercicio ER y NM. Los valores obtenidos para cada modo de ejercicio representan los cambios en T2 del músculo en relación con el T2 del testículo.

Segundo, se observó una declinación de mayor magnitud en la generación de fuerza contráctil en cada serie de ejercicio ER desde la 2^{da} a la 5^{ta} y en comparación con el ejercicio en NM, en la cual se observó solo una pequeña declinación de la generación de fuerza contráctil a lo largo de las 5 series. El cálculo de la correlación efecto-tamaño (r_{η^2}) y el valor d de Cohen utilizando la media y la desviación estándar de la fuerza promedio registrada entre la 2^{da} y 5^{ta} del ejercicio ER arrojó valores de $r_{\eta^2} = 0.50$ y $d = 1.16$, lo cual podría interpretarse como una diferenciación entre el rendimiento en ER y el rendimiento en NM. De acuerdo con esto, si bien la magnitud de la reducción en la fuerza promedio de cada serie de ejercicio ER no alcanzó significancia estadística, parece haber una tendencia definida que sugiere un incremento en la fatigabilidad.

Tercero, observamos que los indicadores de daño muscular (tiempo de relajación T2, DOMS, MVIC y concentración sérica de CK) exhibieron una respuesta similar con ambas modalidades de entrenamiento, NM y ER. Esta similitud en la respuesta a 5 series repetidas (10 RM) de extensiones de rodilla fue evidente a pesar de las fuerzas significativamente mayores producidas por el entrenamiento NM comparado con el entrenamiento ER. Las fuerzas producidas durante el entrenamiento NM fueron en promedio unos 100 Newtons mayores que las producidas durante el entrenamiento con ER. Esta gran diferencia en la producción de fuerza muscular podría suponer que se produce una sobrecarga considerablemente mayor de los músculos del cuádriceps cuando se realiza el entrenamiento NM.

Variables		Pre-Ejercicio	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 7
CK (IU/L)	NM	147 (26)	410 (136) †		705 (185) †		574 (127) †	279 (45)
	ER	167 (54)	331(119) †		595 (147) †		455 (133) †	252 (54)
MVIC (N)	NM	1073 (233)	838 (164)	897 (172)	918 (129)	987 (204)		
	ER	1082 (225)	864 (192)	862 (223)	905 (241)	977 (254)		
DOMS	NM	1 (0)	1.2 (.4) †	2.4 (.5) †	1.9 (.3) *	1 (0)		
	ER	1 (0)	1.3 (.5) †	2.8 (.4) †	1.8 (.4) *	1 (0)		

Tabla 1. Valores de MVIC, DOMS y concentración plasmática de CK durante el curso temporal del período de recuperación. Los datos son medias (\pm DE). NM = Máquina Nautilus, ER = Bandas Elásticas. *Significativamente diferente de los valores pre-ejercicio ($p < 0.05$), †Significativamente diferente de los valores pre-ejercicio ($p < 0.001$).

Una posible explicación para la diferencia en las fuerzas promedios observadas durante el entrenamiento con ER y el entrenamiento NM, a pesar de que las mediciones de sobrecarga y daño muscular hayan sido similares, podría tener relación con la considerable activación de los músculos antagonistas durante el entrenamiento ER. Desafortunadamente, en este estudio no se realizó un EMG completo para respaldar este postulado. La tendencia hacia la reducción en la producción de fuerza durante el entrenamiento con ER desde la 2^{da} a la 5^{ta} serie de extensiones de rodilla sugiere una mayor fatigabilidad con este modo de entrenamiento; aunque esto podría ser consecuencia de un incremento progresivo en la activación de los antagonistas.

Un aspecto sorprendente fue la similitud de las respuestas indicativas de sobrecarga muscular con ambos protocolos de entrenamiento, considerando la mayor fuerza externa empleada durante el entrenamiento NM (26.31%) comparado con el entrenamiento con ER (Figura 2). En estudios previos, el daño muscular luego de un entrenamiento con sobrecarga intenso fue atribuido al estrés mecánico sobre el aparato contráctil durante las contracciones excéntricas (Moritani et al., 1988). Se ha mostrado que una carga externa dada siempre es distribuida en un menor número de fibras musculares activas durante una acción excéntrica (Warren et al., 1993). De este modo, las fuerzas generadas por área de sección cruzada de músculo activo son muy altas. Esta sobrecarga mecánica tiene el potencial de provocar la disrupción de proteínas contráctiles en las fibras musculares reclutadas (Cutlip et al., 2008; Tee et al., 2007). Por lo tanto parece axiomático estipular que el entrenamiento NM provocaría una mayor disrupción de los músculos activos y del tejido conectivo asociado.

El mecanismo subyacente de estos hallazgos es desconocido. Sin embargo, una posible explicación de estos resultados puede encontrarse en el estudio realizado por Cronin et al (2003). Estos investigadores reportaron un incremento en la actividad electromiográfica de los cuádriceps en la fase excéntrica tardía del movimiento durante un ejercicio con ER. Asimismo, en este estudio se especuló que el incremento en la velocidad del segmento al comienzo de la fase excéntrica, debido a la fuerza de retroceso del dispositivo elástico, podría incrementar el momento del segmento, requiriendo una mayor fuerza muscular para desacelerar la carga hacia el final de la fase excéntrica. En relación con esta explicación especulativa, existe evidencia científica que demuestra la exacerbación del daño muscular cuando una carga dada se administra al músculo al final de la fase excéntrica (Lieber and Fraidon, 1993). Por lo tanto, los músculos estirados del cuádriceps pudieron haber experimentado una mayor sobrecarga mecánica al desacelerar el movimiento de la pierna hacia el final de la fase excéntrica durante el ejercicio con ER. Una limitación de este estudio es que no se cuantificó la velocidad segmentaria y el momento de fuerza en diferentes fases del movimiento.

Se ha propuesto que los cambios inmediatos y prolongados en la fuerza isométrica máxima luego del daño muscular inducido por el ejercicio son medios efectivos para evaluar la magnitud y el curso temporal del daño muscular (Byrne et al., 2004; Clarkson and Hubal, 2002; Cutlip et al., 2008). En el presente estudio, se observó una reducción en la MVIC pico durante el día posterior a ambos modos de ejercicio (18.19 % vs 17.52 % para NM y ER, respectivamente); aunque la tasa de reducción fue estadísticamente no significativa. Una posible explicación para la limitada reducción en la fuerza durante una MVIC podría estar relacionada con el estado relativamente activo de los músculos del cuádriceps que son frecuentemente utilizados durante el día para la locomoción (Howatson and van Someren, 2008). La magnitud de la reducción de fuerza en los extensores de la rodilla luego del daño inducido por el ejercicio ha mostrado ser menor (aproximadamente una pérdida del 35%) y la recuperación ha sido característicamente más rápida (4-7 días) en comparación con los flexores del codo (Byrne and Eston, 2002; Komi and Viitasalo, 1977).

La prolongada reducción en la fuerza muscular luego de un entrenamiento con sobrecarga intenso ha sido asociada tanto con la respuesta inflamatoria y con el dolor muscular retrasado (Byrne et al., 2004). Clarkson y Hubal (2002) han

reportado una relación consistente entre el dolor muscular, la concentración plasmática de CK y la reducción prolongada en la fuerza. Sin embargo, un segundo grupo de investigadores obtuvo una débil correlación entre la inhibición central provocada por el dolor percibido y la reducción de la fuerza (Hubal et al., 2007). De acuerdo con esto, la reducción prolongada en la producción de fuerza máxima podría atribuirse a otros mecanismos tales como la disrupción de fibras rápidas (Tipo II) y el reclutamiento compensatorio de fibras musculares lentas (Tipo I) (Bosco et al., 2000), la disrupción de la homeostasis del Ca^{2+} , la desmejora del acoplamiento de excitación-contracción y la alteración de la propagación de impulsos debido a la isquemia (Komi and Tesch, 1979). Los datos de nuestra investigación parecen concordar esta última línea de pensamiento, debido a la mayor pérdida de fuerza observada en el primer día de recuperación, cuando el DOMS y la concentración plasmática de CK no habían alcanzado sus niveles pico (Tabla 1). No es una observación inusual encontrar una respuesta retrasada del DOMS y de la concentración plasmática de CK, lo cual podría sugerir un deterioro progresivo en la membrana de la fibra muscular; derivando en la filtración de CK y en el influjo de fluidos hacia la fibra. Por lo tanto, el edema muscular y la presión asociada estimularían los grupos III y IV de nociceptores precipitando la sensación de DOMS.

La concentración plasmática de CK exhibió una tendencia hacia el incremento en las 24 hs posteriores a cada modo de entrenamiento, evidenciándose concentraciones pico luego de las 48 hs de finalizado el entrenamiento. Considerando que nuestros sujetos eran relativamente desentrenados, nosotros anticipamos un marcado incremento en la concentración plasmática de CK luego de las sesiones de entrenamiento ER y NM. Sin embargo, la magnitud de la respuesta plasmática de la CK (595 a 795 IU/litro) fue relativamente muy baja en comparación con reportes de 20000 IU/litro luego de un trabajo con altas producciones de fuerza excéntrica (Byrnes et al., 1985; Schwane et al., 1983). La baja respuesta de la CK plasmática en el presente estudio podría reflejar un limitado componente excéntrico durante los entrenamientos ER y NM.

La MRI ha sido reconocida como un método directo y no invasivo para valorar el daño muscular (edema) en humanos (Clarkson and Hubal, 2002; Järvinen et al., 2007). Se ha reportado una correlación positiva entre la extensión del daño muscular ultraestructural y la intensidad de la señal del MRI (Takahashi et al., 1994). En el presente estudio se halló un incremento significativo en la intensidad de la señal de MRI asociada con el tiempo de relajación T2 luego de ambos modos de ejercicio, lo cual es indicativo de daño muscular. El incremento en la señal T2 se relaciona con la acumulación de fluido en el músculo dañado debido a la degradación tanto de proteínas estructurales como funcionales conjuntamente con un incremento en la permeabilidad capilar (McCully et al., 1992; Takahashi et al., 1994). Diversos estudios han señalado que el incremento en el tiempo de relajación T2 se encuentra en concordancia con la observación de altas concentraciones de proteínas degradadas (e.g., CK) en la sangre, con el dolor muscular y con el edema muscular (Foley et al., 1999). En el presente estudio se observó una concurrencia entre la actividad plasmática pico de la CK, el pico de dolor muscular y el tiempo de relajación T2, el cual fue significativamente mayor que en la medición pre-entrenamiento con ambos modos de ejercicio.

Estos resultados sugieren un potencial similar de ambos dispositivos de entrenamiento para provocar la sobrecarga muscular e inducir daño muscular. La importancia de estos hallazgos se basa en el hecho de que el daño muscular inducido por el ejercicio ha mostrado ser el mecanismo subyacente de la hipertrofia muscular (Eston et al., 2003; Flann et al., 2011; Howatson and van Someren, 2008). Estudios previos han mostrado que la respuesta inflamatoria posterior a la exposición crónica al daño muscular inducido por el ejercicio está caracterizada por una infiltración de neutrófilos y macrófagos (Cutlip et al., 2009). Estas células inflamatorias producen citoquinas y quimioquinas que activan vías locales que asisten en la reparación del tejido dañado. Los macrófagos fagocíticos también invaden el tejido dañado para digerir el daño estructural y las proteínas funcionales y así promover la regeneración. Durante la adaptación muscular, las células satélite (células musculares precursoras inactivas) son activadas, proliferan y se fusionan con la miofibra existente. Además, durante este período de tiempo, se produce la expresión de isoformas de miosina de cadena pesada en las fibras lesionadas, y se ha sugerido que esto comprende el programa de desarrollo (Cutlip et al., 2009).

Considerando que los dispositivos elásticos han sido ampliamente aceptados como una forma de entrenamiento de bajo costo, portable y versátil en comparación con otros equipamientos tal como las máquinas Nautilus (Page and Ellenbecker, 2003), los datos del presente estudio respaldan la utilización de dispositivos ER como un modo efectivo de entrenamiento para incrementar la fuerza y la hipertrofia muscular en individuos saludables. Esto se contradice con muchas investigaciones previas que han rechazado el potencial de utilizar dispositivos ER en el ámbito deportivo debido a la percepción de que estos dispositivos no proveen un estímulo de entrenamiento adecuado (Hopkins et al., 1999; Hostler et al., 2001).

CONCLUSIONES

En teoría, el dolor muscular inducido por el ejercicio, el incremento en los niveles plasmáticos de CK, el incremento en la señal T2 de MRI y la reducción prolongada de fuerza, indican una intensidad moderada a alta del protocolo de entrenamiento. La similitud de estas respuestas luego del entrenamiento ER y NM sugiere que ambos modos de entrenamiento proveen un estrés global de entrenamiento comparable; a pesar de la producción de fuerza externa considerablemente menor durante el entrenamiento ER. Es posible que hayan existido grandes variaciones en la velocidad de contracción durante el entrenamiento ER a pesar de que los sujetos se adhirieron al ritmo de una contracción cada dos segundos. Dichas variaciones en la velocidad de contracción podrían no solo contribuir a la dificultad de ejecutar la contracción, sino también a acelerar el comienzo de la fatiga, sin un patrón consistente de reclutamiento de fibras musculares lentas y rápidas. Además, esto podría tener implicaciones respecto de la cuantificación de la intensidad de la sesión de entrenamiento como la magnitud de la carga de entrenamiento, cuando es mejor expresar esto en términos de la tasa de trabajo realizado. Sin embargo, este enfoque requiere el preciso cronometraje de todas las fases en las cuales se ejercita el rango de movimiento de la extremidad.

Los datos del presente estudio sugieren que el entrenamiento con bandas elásticas es un modo viable de entrenamiento con sobrecarga que puede proveer un estímulo significativamente mayor que el empleado en la rehabilitación. Sin embargo, los resultados del presente estudio apuntan a la necesidad de estudios adicionales que investiguen la efectividad de los dispositivos ER para desarrollar la fuerza y la hipertrofia muscular con un programa de entrenamiento de larga duración.

Puntos Clave

- El dolor muscular inducido por el ejercicio, el incremento de los niveles plasmáticos de CK, el incremento en la señal T2 de MRI y la reducción prolongada de fuerza indican la naturaleza moderada a intensa del protocolo de entrenamiento.
- La similitud de estas respuestas luego de una sesión de entrenamiento con Bandas Elásticas y con Máquinas Nautilus sugiere que ambos modos de entrenamiento proveen un estímulo similar; a pesar de la considerablemente menor producción de fuerza externa con el ER.
- Los datos del presente estudio sugieren que el entrenamiento con bandas elásticas es un modo viable de ejercicio con sobrecarga que puede proveer un estímulo de entrenamiento mayor al empleado en la rehabilitación.

Agradecimientos

Este estudio fue realizado gracias a una Beca de Investigación provista por la Universidad de Malaya, Masia (PS008/2008C)

REFERENCIAS

1. Arendt-Nielsen, L. and Mills, K (1988). Muscle fibre conduction velocity, mean power frequency, mean EMG voltage and force during submaximal fatiguing contractions of human quadriceps. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 58, 20-25
2. Bosco, C., Colli, R., Bonomi, R., Von Duvillard, S.P. and Viru, A (2000). Monitoring strength training: neuromuscular and hormonal profile. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 32, 202-208
3. 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
4. Byrne, C., Twist, C. and Eston, R (2004). Neuromuscular Function after Exercise-Induced Muscle Damage: Theoretical and Applied Implications. *Sports Medicine* 34, 49-69
5. Byrnes, W.C., Clarkson, P.M., White, J.S., Hsieh, S.S., Frykman, P.N. and Maughan, R.J (1985). Delayed onset muscle soreness following repeated bouts of downhill running. *Journal of Applied Physiology* 59, 710-715
6. Carolan, B. and Cafarelli, E (1992). Adaptations in coactivation after isometric resistance training. *Journal of Applied Physiology* 73(3), 911-917
7. Clarkson, P. and Hubal, M (2002). Exercise-induced muscle damage in humans. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 81(Suppl. 11), 52-69
8. Cronin, J., McNair, P. and Marshall, R (2003). The effects of bungee weight training on muscle function and functional performance. *Journal of Sports Sciences* 21, 59-71
9. Cutlip, R.G., Baker, B.A., Hollander, M. and Ensey, J (2009). Injury and adaptive mechanisms in skeletal muscle. *Journal of*

10. Ebben, W.E. and Jensen, R.L (2002). Electromyographic and Kinetic Analysis of Traditional, Chain, and Elastic Band Squats. *The Journal of Strength & Conditioning Research 16, 547-550*
11. Eston, R., Byrne, C. and Twist, C (2003). Muscle function after exercise-induced muscle damage: Considerations for athletic performance in children and adults. *Journal of Exercise Science and Fitness 1, 85-96*
12. Flann, K., LaStayo, P., McClain, D., Hazel, M. and Lindstedt, S (2011). Muscle damage and muscle remodelling: no pain, no gain?. *Journal of Experimental Biology 15, 674-679*
13. Foley, J.M., Jayaraman, R.C., Prior, B.M., Pivarnik, J.M. and Meyer, R.A (1999). MR measurements of muscle damage and adaptation after eccentric exercise. *Journal of Applied Physiology 87, 2311-2318*
14. Graves, J.E., Pollock, M.L., Jones, A.E., Colvin, A.B. and Leggett, S.H (1989). Specificity of limited range of motion variable resistance training. *Medicine & Science in Sports & Exercise 21, 84-89*
15. Hintermeister, RA, Bey, MJ, Lange, GW, Steadman, JR and Dillman, CJ (1998). Quantification of Elastic Resistance Knee Rehabilitation Exercises. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy 228(1), 40-50*
16. Hodges, G.N (2006). The effect of movement strategy and elastic starting strain on shoulder resultant joint moment during elastic resistance exercise. *Master Thesis. School of Medical Rehabilitation, Faculty of Medicine, University of Manitoba*
17. Hopkins, J.T., Christopher, D.I., Michelle, A.S. and Susan, D.B (1999). An Electromyographic Comparison of 4 Closed Chain Exercises. *Journal of Athletic Training 34, 353-357*
18. Hopkins W.G (2006). Estimating sample size for magnitude-based inferences. *SportScience 10, 63-70. Available from URL: <http://sportsci.org/resource/stats/ssdetermine.html>*
19. Hostler, D., Schwirian, C.I., Campos, G., Toma, K., Hagerman, F.C. and Staron, R.S (2001). Skeletal muscle adaptation in elastic resistance training young men and women. *European Journal of Applied Physiology 86, 112-118*
20. Howatson, G. and van Someren, K.A (2008). The prevention and treatment of exercise induce muscle damage. *Sports Medicine 38, 483-503*
21. Hubal, M.J., Rubinstein, S.R. and Clarkson, P.M (2007). Mechanisms of variability in strength loss after muscle-lengthening actions. *Medicine & Science in Sports & Exercise 39, 461-468*
22. Hughes, C.J., Hurd, K., Jones, A. and Sprigle, S (1999). Resistance properties of Thera-Band® tubing during shoulder abduction exercise. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy 29, 413-420*
23. Israetel MA, McBride JM, Nuzzo JL, Skinner JW, Dayne AM (2010). Kinetic and kinematic differences between squats performed with and without elastic bands. *Journal of Strength and Conditioning Research 24(1), 190-194*
24. Järvinen TAH, Järvinen TLN, Käräinen M, Äärimaa V, Vaittinen S, Kalimo H, Järvinen M (2007). Muscle injuries: optimising recovery. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology 21, 317-331*
25. Komi, P.V. and Tesch, P.A (1979). EMG frequency spectrum, muscle structure, and fatigue during dynamic contractions in men. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology 42, 41-50*
26. Komi, P.V. and Viitasalo, J (1977). Changes in motor unit activity and metabolism in human skeletal muscle during and after repeated eccentric and concentric contractions. *Acta Physiology Scandinavia 100, 246-254*
27. Kraemer, W., Gordon, S., Fleck, S., Marchitelli, L., Mello, R., Dziados, J., Friedl, K., Harman, E., Maresh, C. and Fry, A (1991). Endogenous anabolic hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise in males and females. *International Journal of Sports Medicine 12, 228-235*
28. Kraemer, W.J., Duncan, N.D. and Volek, J.S (1998). Resistance training and elite athletes: adaptations and program considerations. *Journal of Orthopaedic and Sport Physical Therapy 28, 110-119*
29. Lieber, R. and Fraidon, J (1993). Muscle damage is not a function of muscle force but active muscle strain. *Journal of Applied Physiology 74, 520-526*
30. Linnamo, V., Bittas, R. and Komi, P (2000). Force and EMG power spectrum during and after eccentric and concentric fatigue. *Journal of Electromyography and Kinesiology 10, 293-300*
31. Linnamo, V., Newton, R.U., Häkkinen, K., Komi, P.V., Davie, A., McGuigan, M. and Triplett-McBride, T (2000). Neuromuscular responses to explosive and heavy resistance loading. *Journal of Electromyography and Kinesiology 10, 417-424*
32. Manning, R.J., Graves, J.E., Carpenter, D.M., Leggett, S.H. and Pollock, M.L (1990). Constant vs variable resistance knee extension training. *Medicine & Science in Sports & Exercise 22, 397-401*
33. McCully K, Vandenborne K, DeMeirleir K, Posner J, Leigh JJ (1992). Muscle metabolism in track athletes, using 31P magnetic resonance spectroscopy. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology 70, 1353-1359*
34. Moritani, T., Muramatsu, S. and Muro, M (1988). Activity of motor units during concentric and eccentric contractions. *American Journal of Physical Medicine 1123, 214-224*
35. Newham, D., McPhail, G., Mills, K. and Edwards, R (1983). Ultrastructural changes after concentric and eccentric contractions of human muscle. *Journal of the Neurological Sciences 61, 109-122*
36. Newsam, C., Leese, C. and Fernandez-Silva, J (2005). Intratester reliability for determining an 8-repetition maximum for 3 shoulder exercises using elastic bands. *Journal of Sport Rehabilitation 14, 35-47*
37. Page P., Lamberth J., Abadie B., Boling R., Collins R. and Collins R (1993). Posterior rotator cuff strengthening using Theraband® in a functional diagonal pattern in collegiate baseball pitchers. *Journal of Athletic Training 28(4), 346-354*
38. Page, P. and Ellenbecker, T (2003). The Scientific and Clinical Application of Elastic Resistance. *Human Kinetics*
39. Schwane, J.A., Johnson, S.R., Vandenakker, C.B. and Armstrong, R.B (1983). Delayed-onset muscular soreness and plasma CPK and LDH activities after downhill running. *Medicine and Science in Sports and Exercise 15, 51-56*
40. Simoneau, G.G., Bereda, S.M., Sobush, D.C. and Starsky, A.J (2001). Biomechanics of elastic resistance in therapeutic exercise programs. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy 31, 16-24*
41. Smith, L.L (1991). Acute inflammation: the underlying mechanism in delayed onset muscle soreness?. *Medicine & Science in Sports & Exercise 23, 542-551*
42. Takahashi, H., Kuno, S., Miyamoto, T., Yoshioka, H., Inaki, M., Akima, H., Katsuta, S., Anno, I., Itai, Y (1994). Changes in magnetic

- resonance images in human skeletal muscle after eccentric exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 69, 408-13
43. Tee, J.C., Bosch, A.N. and Lambert, M.I (2007). Metabolic consequences of exercise-induced muscle damage. *Sports Medicine* 37, 827-836
44. Treiber, F.A., Lott, J., Duncan, J., Slavens, G. and Davis, H (1998). Effects of theraband and lightweight dumbbell training on shoulder rotation torque and serve performance in college tennis players. *The American Journal of Sports Medicine* 26, 510-515
45. Vincent W.J (2005). Statistics in kinesiology. *Third Edition, Human Kinetics*. 147-151
46. Wallace B.J., Winchester J.B. and McGuigan M.R (2006). Effects of elastic bands on force and power characteristics during the back squat exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research* 20, 268-272
47. Warren, G.L., Lowe, D.A., Hayes, D.A., Karwoski, C.J., Prior, B.M. and Armstrong, R.B (1993). Excitation failure in eccentric contraction-induced injury of mouse soleus muscle. *Journal of Physiology* 468, 487-499

Cita Original

Saied Jalal Aboodarda, John George, Abdul Halim Mokhtar and Martin Thompson. Muscle Strength and Damage Following Two Modes of Variable Resistance Training. *Journal of Sports Science and Medicine* (2011) 10, 635 - 642