

Artículo

Efectos del Entrenamiento de la Fuerza Concéntrica Versus Excéntrica en la Estructura y Función del Extensor de Rodilla en Adultos Mayores

Rafael Baptista¹, Eduardo Onzi², Natália Goulart², Luis Dos Santos¹, Gabriel Makarewicz¹ y Marco Vaz²

¹Escuela de Educación Física / Universidad Católica Pontificia de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

²Escuela de Educación Física / Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

RESUMEN

Baptista R, Onzi E, Goulart N, Dos Santos LD, Makarewicz G, Vaz M. Efectos del Entrenamiento de la Fuerza Concéntrica Versus Excéntrica en la Estructura y Función del Extensor de Rodilla en Adultos Mayores. JEPonline 2016;19(3):120-132. El propósito de este estudio fue comparar los efectos de un programa de 12-sem de entrenamiento de fuerza excéntrica versus concéntrica en las propiedades del cuádriceps de hombres de edad avanzada. Veintitrés sujetos realizaron extensión concéntrica de rodilla en un lado y flexión excéntrica de rodilla en el lado contralateral al 80% de 5RM. Ambos protocolos aumentaron la fuerza del extensor de la rodilla. La longitud del fascículo del vasto lateral disminuyó y el ángulo de peneación aumentó sin cambios en el grosor del músculo en ambos protocolos. La longitud del tendón patelar aumentó luego de ambos protocolos, pero el área de la sección transversal del tendón aumentó sólo después del entrenamiento excéntrico. El torque isométrico y dinámico aumentó en ambos grupos. El entrenamiento concéntrico y excéntrico se puede usar con resultados similares en adultos mayores.

Palabras Clave: Entrenamiento de la Fuerza, Envejecimiento, Tipo de Contracción

INTRODUCCIÓN

El entrenamiento de la fuerza es comúnmente prescrito como una forma efectiva de revertir la pérdida de la masa y fuerza muscular debida al envejecimiento, y de generar adaptaciones morfológicas y funcionales positivas en los músculos esqueléticos (25). Se ha sugerido que el entrenamiento de la fuerza es capaz de aumentar el largo de la fibra muscular y el ángulo de peneación en los adultos mayores, lo que indica que estos efectos de este tipo de entrenamiento pueden ser verificados en el aumento seriado y paralelo de los sarcómeros en esta población (30, 31).

Las adaptaciones de los músculos esqueléticos al entrenamiento de la fuerza son fuertemente influenciadas por su arquitectura. Los músculos con mayor volumen y área de sección transversal fisiológica generan más fuerza debido al

mayor contenido de miofilamentos en sus miofibrillas. Asumir que la arquitectura muscular es altamente plástica, entender cómo los diferentes estímulos mecánicos influyen estas adaptaciones musculares morfológicas, es de fundamental importancia para los profesionales de la salud e investigadores interesados en optimizar la función y el rendimiento muscular (3) y, en particular, en los ancianos.

La adaptación del tendón con el entrenamiento de la fuerza es otro factor que parece influenciar las propiedades mecánicas del músculo en los adultos mayores. Fyfe y Stanish (12) han demostrado que el entrenamiento de fuerza aumenta la dureza del tendón debido a las adaptaciones de las propiedades de la materia como el crecimiento en la estructura fibrosa del tendón en la matriz extracelular. Estas adaptaciones aumentan significativamente la transmisión de fuerza muscular a los huesos a través de los tendones, aumentando el índice del desarrollo del torque en el músculo.

Los estudios de plasticidad neuromuscular (6, 24) han sugerido un aumento en la longitud de la fibra muscular de aquellos músculos que han estado sujetos al trabajo excéntrico de forma crónica, mientras que se ha observado una reducción (6) o mantenimiento (24) de la longitud del fascículo en los músculos que trabajan de forma concéntrica. Estos resultados indican que el tipo de contracción es el principal estímulo para estos cambios en la longitud del fascículo.

Por lo tanto, uno podría preguntarse: ¿Cuál es el mejor tipo de entrenamiento para contrarrestar los efectos del envejecimiento en el sistema muscular? El propósito de este estudio fue comparar los efectos de un programa de entrenamiento excéntrico y un programa de entrenamiento concéntrico en las propiedades mecánicas y morfológicas de la unidad músculo-tendinosa del extensor de la rodilla en los adultos mayores para mejorar nuestro entendimiento sobre las adaptaciones musculares en ejercicios resistivos en esta población.

MÉTODOS

Aspectos Éticos

El estudio fue aprobado por el Comité Ético de Investigación de ambas universidades donde éste fue llevado a cabo por el protocolo número 2008064 y 09/04857. Los ensayos se realizaron con el conocimiento y consentimiento escrito de cada sujeto, y el estudio fue hecho de acuerdo a La Declaración de Helsinki.

Sujetos

Veintitrés sujetos masculinos adultos mayores (62.74 ± 2.20 años de edad, 80.21 ± 14.82 kg de masa corporal, y 172.02 ± 6.11 cm de altura) aceptaron participar en este estudio. El tamaño de la muestra fue calculado basándose en la ecuación propuesta por Eng (8), la cual indica el tamaño de la muestra según el nivel de significancia, el poder estadístico y la diferencia esperada entre los grupos, y la desviación estándar de estudios previos utilizando una metodología similar. El grosor muscular y el ángulo de peneación se usaron para el cálculo del tamaño de la muestra basado en los datos de Suetta et al. (36). Estas variables fueron elegidas por la influencia que ejercen en la producción de la fuerza y, consecuentemente, en la funcionalidad de los adultos mayores. Con la desviación estándar obtenida para el grosor muscular (1.3 mm) y el ángulo de peneación (0.5°), así como el aumento esperado de estas variables luego del entrenamiento de la fuerza (2.2 mm y 1.4°), la muestra obtenida fue de 11 y 4 sujetos, respectivamente. También se usaron los resultados obtenidos por Suetta et al. (36) para el test de máximo poder que va desde sentado a la posición de parado para el cálculo del tamaño de la muestra porque es una variable funcional extremadamente importante en los ancianos. Con la desviación estándar para esta variable ($0.4 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$), y la diferencia esperada del pre-entrenamiento al post-entrenamiento ($0.9 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$), el tamaño de la muestra fue determinado como 6 sujetos. Por lo tanto, el tamaño de la muestra indicado en los tres cálculos se sumó, resultando así en un tamaño de muestra de 21 sujetos. Debido a la posibilidad de un 20% de pérdida de muestra, el tamaño de la muestra se incrementó a 25 sujetos. A lo largo del estudio, 2 sujetos abandonaron el programa de entrenamiento. Por lo tanto, 23 sujetos finalizaron el estudio.

Entrenamiento de la Fuerza

Las sesiones de entrenamiento se realizaron dos veces por semana y aquí los extensores de la rodilla de una pierna de cada sujeto, fueron sometidos a un programa de entrenamiento excéntrico (se refirió a éstos como el Grupo Excéntrico, GE) y los del lado contralateral, a un programa de entrenamiento concéntrico (es decir, el Grupo Concéntrico, GC). La asignación del miembro para cada programa de entrenamiento fue realizada al azar durante la primera visita al laboratorio. Todos los sujetos entrenaron a la misma hora del día bajo la supervisión de dos investigadores que controlaron la ejecución de la duración de los ejercicios y los intervalos entre series de 1 min.

El entrenamiento fue ejecutado con la ayuda de una máquina convencional para entrenamiento de la fuerza del extensor de

la rodilla (Taurus®, Porto Alegre, Brasil). Este equipamiento utiliza poleas simétricas con el mayor torque de resistencia aplicado cuando la rodilla está completamente extendida, y con una reducción de la carga durante la flexión de rodilla.

La metodología de entrenamiento fue similar a la de Reeves et al. (28) quien comparó la adaptación mecánica y morfológica de los cuádriceps entre el entrenamiento excéntrico y los programas convencionales (concéntrico-excéntrico) en los adultos mayores durante los ejercicios de prensa de pierna y del extensor de rodilla. De acuerdo al programa de entrenamiento excéntrico de estos autores, los sujetos deben ejecutar la extensión de rodilla sin carga con la ayuda del investigador quien eleva la carga de forma manual. Luego, los sujetos descansaron durante 0.5 seg de modo que la carga pudiera ser transferida al miembro de los sujetos y ellos deberían resistir la carga de forma excéntrica durante la flexión de rodilla hasta 90° (rodilla totalmente extendida = 0°) durante 3 seg (Figura 1).

El entrenamiento concéntrico consistió en la extensión concéntrica de rodilla con una sobrecarga durante un período de 3 seg seguida de una pausa de 0.5 seg para que el investigador sostuviese completamente la carga y, luego, una flexión de rodilla sin carga hasta los 90°. La carga fue ajustada durante el programa de entrenamiento cuando los sujetos podían ejecutar más de 10RM.

Fuerza Máxima

Se definieron cinco repeticiones máximas (5RM) como la mayor carga que los sujetos podían soportar de una manera controlada durante 3 seg de flexión de rodilla concéntrica o excéntrica. El test de 5RM fue evaluado antes del comienzo del programa de entrenamiento y después de 12 semanas de entrenamiento de fuerza.

Arquitectura del Músculo Vasto Lateral

Se utilizó un sistema modo-B de ultrasonido con transductor lineal (60 mm, 7.5 MHz - SSD 4000, 51 Hz, ALOKA Inc., Tokyo, Japón) para evaluar la arquitectura muscular en reposo. Las medidas resultantes incluyeron el largo del fascículo, el ángulo de peneación y el grosor del músculo. Los sujetos fueron evaluados sentados con la cadera flexionada a 90° y la rodilla extendida a 10° de la flexión de rodilla. La posición de flexión de rodilla de 10° fue elegida por ser la posición generalmente usada para la evaluación de la arquitectura muscular (30, 31) sin un estiramiento excesivo de los músculos de la corva en la posición de sentado. Además, en este ángulo articular, los fascículos musculares se encontraban de forma que permitían la completa visualización de los fascículos musculares en la mayoría de las evaluaciones en las imágenes del ultrasonido. Las medidas de ultrasonido se obtuvieron al 50% de la longitud del vasto lateral sobre una línea entre la espina ilíaca ántero-superior y el epicóndilo lateral del fémur (22).

La sonda ultrasónica fue embebida en un gel de transmisión acústico soluble en agua que originó un contacto acústico entre la sonda y la piel sin presionar la piel. La sonda se ubicó paralela a la dirección de las fibras musculares. Las medidas antropométricas se realizaron a partir de dos puntos anatómicos: la distancia entre el margen proximal de la patela en el plano sagital y la distancia del punto medio del muslo en el plano transversal. Esto creó un sistema de coordenadas Cartesianas (x, y) para la determinación de la posición de la sonda. Este sistema de coordenadas también se tuvo en cuenta para el reposicionamiento de la sonda en las evaluaciones post-entrenamiento. Las evaluaciones post-entrenamiento se obtuvieron 48 hs después de la última sesión de entrenamiento con el fin de evitar la influencia de un edema post-entrenamiento en las imágenes de la arquitectura muscular. Estas imágenes se grabaron constantemente en DVD con un grabador de DVD externo (R130/XAZ, Samsung Inc., Seoul, Korea del Sur).

Las imágenes de ultrasonido se sincronizaron con el torque y las señales EMG a través de un pulso de sincronización al sistema de adquisición de datos y un cronómetro (HORITA Video Stop Watch VS - 50; HORITA Co., Inc., California, EEUU) al grabador de DVD. Esto permitió la selección de las imágenes correspondientes al período de descanso en ambos sistemas. Los datos de la arquitectura muscular se grabaron en DVDs, y el video obtenido se transformó al formato MPEG con el programa BitRipper (Binotex, EEUU). Las imágenes de ultrasonido fueron seleccionadas en tiempos específicos del archivo de video MPEG utilizando el programa Virtual Dub (Avery Lee, EEUU). Las imágenes de ultrasonido se analizaron a través de archivos de escritura creados en MATLAB (MATLAB version 7.3.0.267, MathWorks, Inc., Natick, MA).

Se usó una sola imagen de cada músculo para los análisis de datos, y se analizaron tres fascículos de cada imagen. El valor promedio para la longitud del fascículo y el ángulo de peneación se calculó a partir de estos tres fascículos musculares. Para el grosor muscular, se obtuvieron tres medidas de cada imagen: (i) una proximal; (ii) una del medio de la imagen; y (iii) una distal. El grosor muscular se determinó como el valor promedio entre estas tres medidas.

El grosor muscular se obtuvo desde la distancia entre la aponeurosis superficial y la profunda (22). El ángulo de peneación se determinó como el ángulo entre la línea de acción del fascículo y la aponeurosis profunda. La longitud del fascículo se definió como el largo del fascículo en su trayectoria entre la aponeurosis superficial y la profunda. La longitud del fascículo se estandarizó a la longitud del muslo (longitud relativa). La longitud del muslo se determinó como la distancia entre el trocánter mayor y el epicóndilo lateral del fémur (23).

Propiedades Morfológicas del Tendón Patelar

Las propiedades morfológicas del tendón patelar se obtuvieron con los sujetos sentados con las rodillas y caderas flexionadas a 90° y la sonda lineal colocada en dos posiciones distintas en el tendón patelar: (a) en el plano sagital para determinar la longitud del tendón; y (b) en el plano transversal para obtener el área de sección transversal del tendón (13). La longitud del tendón se determinó como la distancia entre el punto de inserción en la tibia y en la patela. El área de sección transversal se obtuvo con la sonda posicionada transversalmente en la mitad del tendón (13). Las marcas anatómicas se realizaron en la piel y se usaron las medidas de la distancia de la sonda al maléolo lateral para controlar una posición similar de la sonda entre las evaluaciones pre-entrenamiento y post-entrenamiento.

Las propiedades morfológicas del tendón patelar fueron sometidas a los mismos procedimientos descritos anteriormente para la arquitectura del VL en cuanto a la recolección de datos para obtener las imágenes de ultrasonido y durante el análisis de datos. La longitud del tendón patelar se determinó como la distancia entre su origen en el ápex de la patela y su inserción en la tibia (13) a través del software ImageJ (Instituto Nacional de Salud - NIH, EEUU). El área de sección transversal del tendón patelar se determinó calculando el área del tendón a partir de la imagen transversal del tendón a través del programa ImageJ (Instituto Nacional de Salud - NIH, EEUU) (37).

Propiedades Mecánicas del Extensor de Rodilla

Los sujetos se sentaron en el dinamómetro isocinético (Biodex Medical System, Shirley - NY, EEUU), y se obtuvieron los torques del extensor de rodilla de ambos miembros. La articulación de la cadera flexionada se mantuvo en 85° aproximadamente (20) con el sujeto fijado a la silla con cinturones de Velcro en el pecho, abdomen y muslo. La pierna del sujeto fue fijada al brazo del dinamómetro con un cinturón de Velcro a 3 cm por encima del maléolo interno. El eje aparente de la articulación de la rodilla fue alineado con el eje de rotación del dinamómetro. Los miembros superiores se mantuvieron cruzados sobre el pecho con la mano sujetando firmemente el cinturón.

Cada sujeto ejecutó una sesión de familiarización que consistió en contracciones voluntarias isométricas máximas a diferentes ángulos articulares de la rodilla y contracciones excéntricas y concéntricas a diferentes velocidades angulares. Luego de la familiarización, los sujetos ejecutaron una contracción voluntaria isométrica máxima del extensor de rodilla en cuatro diferentes configuraciones articulares: 30°, 50°, 60° y 70° de flexión de rodilla (extensión completa de rodilla = 0°), en este orden, por un período de 5 seg cada una. Estos ángulos articulares se eligieron por ser el rango normal de movimiento utilizado en programas de entrenamiento de fuerza para adultos mayores (11).

Todos los sujetos fueron instruidos: (a) a producir fuerza máxima tan rápido como fuese posible hasta que alcanzaran su capacidad máxima de generación de fuerza y (b) a mantener este esfuerzo máximo por al menos 1 seg antes de relajarse. Herzog and ter Keurs (17) plantearon que este procedimiento ayudaba a garantizar que todas las fibras musculares permanecieran en una longitud de fibra constante durante la producción de la fuerza.

Se observó un intervalo de 2 min entre las contracciones para minimizar una posible fatiga y/o efectos de fuerza-tiempo. El test se repetía si se observaban las siguientes situaciones: (a) cuando el sujeto o el investigador sentían que el esfuerzo no era máximo o (b) cuando la contracción no era mantenida por al menos 1 seg (17).

Además, se obtuvieron tres torques máximos excéntricos y concéntricos del extensor de rodilla a cuatro velocidades angulares diferentes: 60°·s-1, 120°·s-1, 180°·s-1, y 240°·s-1, (11). Se observó un intervalo de 2-min entre cada velocidad angular para minimizar posibles efectos de fatiga. Las contracciones excéntricas se representaron como torque negativo con un signo menos. La relación ángulo-torque (A-T) se obtuvo a partir del torque voluntario isométrico máximo en cada ángulo articular. Los valores de torque absoluto se estandarizaron por el torque máximo.

Entre las tres curvas de velocidad-torque obtenidas en las contracciones excéntricas y concéntricas, sólo la curva con el torque máximo se usó para análisis a cada velocidad angular. Los torques obtenidos a velocidad angular de 60°·s-1, se utilizaron para estandarizar los torques obtenidos a las otras velocidades angulares. La razón para usar este torque dinámico para la estandarización, en vez de usar el torque isométrico máximo, fue utilizar una situación más funcional para la estandarización. Los valores promedio y desviación estándar se calcularon para todos los valores de torque en todas las contracciones dinámicas e isométricas. Durante las evaluaciones de arquitectura muscular y torque, a los investigadores no se les dio a conocer el programa de entrenamiento de piernas.

Análisis Estadísticos

Un ANOVA bidireccional (entrenamiento excéntrico versus concéntrico) de medidas repetidas (pre-entrenamiento versus post-entrenamiento), con un nivel de significancia de 5%, se utilizó para comparar: (a) la arquitectura del músculo vasto lateral (longitud del fascículo, ángulo de peneación, y grosor muscular); (b) las propiedades morfológicas del tendón patelar (longitud del tendón y área de sección transversal anatómica); (c) la relación ángulo-torque; y (d) la relación

torque-velocidad entre los grupos concéntricos y excéntricos.

Se determinaron diferencias significativas con el test Bonferroni *post-hoc*. Se utilizó un t-test Estudiante independiente para comparar los cambios relativos del pre al post-entrenamiento entre grupos, con un nivel de significancia de 5%. El análisis estadístico fue realizado con el software GraphPad InStat 3.06 (GraphPad Software, San Diego, California, EEUU).

RESULTADOS

Fuerza Máxima, Arquitectura Muscular y Propiedades Morfológicas del Tendón Patelar

Los resultados principales de este estudio revelan que el programa de entrenamiento concéntrico de 12-sem y el programa de entrenamiento excéntrico de 12-sem mejoran la fuerza, la arquitectura muscular y la estructura del tendón.

La fuerza máxima (medida por el test de 5RM) aumentó linealmente a lo largo del programa de entrenamiento excéntrico, de 35.43 ± 6.01 kg en el pre-entrenamiento a 41.30 ± 5.88 kg ($P < 0.05$) después de 6 semanas y luego 45.65 ± 6.96 kg al final del entrenamiento ($P < 0.05$). Por otro lado, el aumento de la fuerza ocurrió sólo en las primeras 6 semanas de entrenamiento concéntrico, de 22.61 ± 3.95 kg a 25.87 ± 3.58 kg ($P < 0.05$) y, luego, se estabilizó (26.74 ± 4.67 kg) al final del entrenamiento. A pesar de los cambios en la producción de la fuerza, las modificaciones de la arquitectura muscular fueron similares entre los grupos. Hubo un aumento significativo ($P < 0.05$) post- excéntrico en el área de sección transversal del tendón patelar, pero no durante el entrenamiento post-concéntrico (Tabla 1).

Tabla 1. Cambios en la Arquitectura Muscular del Vasto Lateral (VL) y en la Morfología del Tendón Patelar (TP) en Grupos Concéntricos (Con) y Excéntricos (Exc).

	Conc Pre	Conc Post	Δ Conc (%)	Exc Pre	Exc Post	Δ Exc (%)
Longitud de Fascículo VL (mm)	172.75 ± 78.07	129.59 ± 47.93	(-)24.98	168.89 ± 73.39	122.97 ± 39.12	(-)27.19
Ángulo de Penación VL(°)	6.79 ± 3.31	9.68 ± 3.79	42.56	7.44 ± 4.28	9.62 ± 3.84	29.3
Grosor Muscular VL(mm)	16.75 ± 5.28	18.17 ± 5.17	8.48	16.36 ± 6.10	17.59 ± 5.19	7.52
Longitud Tendón Patelar(mm)	37.88 ± 3.98	45.00 ± 5.85	18,00	38.29 ± 4.88	43.81 ± 5.23	14.42
Área de Sección Transversal del Tendón Patelar (mm²)	9.35 ± 2.91	9.87 ± 1.78	5.56	9.15 ± 1.45	10.30 ± 1.30	12.57

Pie de Foto: Longitud Fascicular del VL (LF); Longitud Fascicular Relativa (LFR); Ángulo de Peneación del VL (AP); Grosor Muscular del VL (GM); Longitud del Tendón Patelar (LTP); Área de Sección Transversal del Tendón Patelar (ASTTP); Δ % cambio entre el pre-entrenamiento y el post-entrenamiento; * $P < 0.05$.

Propiedades Mecánicas del Extensor de Rodilla

Ambos grupos, concéntricos y excéntricos, mostraron un incremento similar ($P > 0.05$) en los torques isométricos máximos en los ángulos articulares de rodilla de 50°, 60°, 70°, y 90° ($P < 0.05$), pero no a 30° ($P > 0.05$). El entrenamiento concéntrico llevó a un aumento del torque a las velocidades angulares excéntricas de -240°·seg-1, -180°·seg-1, -120°·seg-1, -60°·seg-1, a la contracción isométrica máxima (0°/seg-1) y a las velocidades angulares concéntricas de 180°·seg-1 y 240°·seg-1 ($P < 0.05$). El entrenamiento excéntrico causó un aumento significativo del torque en la contracción isométrica máxima (0°·seg-1) y a las velocidades angulares concéntricas y excéntricas de 60°·seg-1, 120°·seg-1, y 180°/seg-1 ($P < 0.05$). No se observaron diferencias entre-grupos ($P > 0.05$). Las relaciones estandarizadas de ángulo-torque y velocidad-torque fueron similares ($P > 0.05$) entre los dos grupos de entrenamiento.

DISCUSIÓN

Fuerza Máxima y Arquitectura Muscular

Como las ganancias de la arquitectura muscular fueron similares en post programas de entrenamiento concéntrico y excéntrico, el aumento lineal de la fuerza observado en el test de 5RM podría estar relacionado a la mayor carga mecánica que las contracciones excéntricas ejercen sobre el músculo esquelético. De hecho, un meta-análisis relacionado a los resultados post-entrenamiento de fuerza indica que, a pesar de la velocidad del entrenamiento y el test, el entrenamiento excéntrico ejecutado a altas intensidades está asociado a una gran mejora de la fuerza comparado con el entrenamiento concéntrico (32).

Cuando se realizan de forma aislada, las acciones musculares excéntricas han demostrado varias propiedades fisiológicas diferentes de aquellas observadas en las acciones concéntricas. Por ejemplo, se han observado patrones de activación neural diferentes con estos dos tipos de contracciones musculares (9). Comparadas con las acciones concéntricas, las contracciones excéntricas se caracterizan por una actividad cortical más rápida y más amplia al ejecutar los movimientos (10) así como también por patrones diferentes de activación de unidad motora (26), y por adaptaciones neurales más rápidas secundarias al entrenamiento de la fuerza (18).

Nuestros resultados de arquitectura muscular coinciden con aquellos de Reeves y sus colegas (28) quienes evaluaron 9 sujetos que realizaron un programa de entrenamiento de fuerza convencional de 14-sem que consistió en acciones musculares concéntricas y excéntricas y 10 sujetos que realizaron un programa de entrenamiento excéntrico del extensor de rodilla de 14-sem. Reeves et al. (28) observó un aumento de la longitud del fascículo en el músculo vasto lateral de ambos grupos, aunque el incremento fue mayor (20%) con el programa de entrenamiento excéntrico comparado con el programa de entrenamiento convencional. Ellos también observaron un aumento del 35% en el ángulo de peneación del vasto lateral del grupo de entrenamiento convencional, pero no en el grupo de entrenamiento excéntrico (5%). El grosor muscular también aumentó de una forma similar en ambos grupos de entrenamiento.

Blazevich et al. (4) evaluó los efectos de 10 semanas de entrenamiento excéntrico (n=12) versus 10 semanas de entrenamiento concéntrico (n=12) en sujetos jóvenes. Encontraron un aumento del 4.7% en la longitud del fascículo en ambos grupos, y sugirieron que otra cosa distinta al tipo de contracción era el factor principal para las adaptaciones de entrenamiento específicas. Especularon que el rango articular de movimiento utilizado para los programas de entrenamiento (100° a 5°, 0° = extensión completa de rodilla), que fue similar al usado en el presente estudio (100° a 5°) podría haber sido el estímulo principal para las adaptaciones observadas en la longitud del fascículo. Este rango articular de movimiento es sustancialmente más alto que el observado al caminar, el cual es de 25° aproximadamente (1), al correr 55° aprox (2), al saltar a 80° aprox (5), y al subir escaleras con un rango articular de movimiento de 88° aprox (1). Este factor se podría considerar como un estímulo mayor que el generado por movimientos dentro de un rango articular de movimiento normal.

Sin embargo, Blazevich et al. (3) los programas de entrenamiento excéntrico y concéntrico se llevaron a cabo con un dinamómetro isocinético, utilizando series de seis contracciones voluntarias máximas con contracción muscular máxima a lo largo de todo el rango de movimiento. Esto es importante ya que nuestros resultados indican que, además del tipo de contracción y el rango articular de movimiento utilizado durante el entrenamiento, también es importante determinar las características biomecánicas del equipamiento utilizado para el entrenamiento para un mejor conocimiento de las adaptaciones morfológicas del músculo esquelético que resultan del entrenamiento de la fuerza.

Propiedades Morfológicas del Tendón

Nuestros resultados muestran un aumento significativo en el área de sección transversal anatómica del tendón patelar sólo cuando los músculos cuádriceps estaban entrenados excéntricamente, aunque ambos tendones patelares mostraron un incremento en la longitud. La mayor carga mecánica durante el entrenamiento excéntrico comparada con el entrenamiento concéntrico puede haber resultado en un mayor aumento del contenido de tejido conectivo que refuerza su estructura. Stanish et al. (35) y Fyfe y Stanish (12) sugieren que durante el entrenamiento excéntrico el tendón está expuesto a mayores fuerzas comparado con el entrenamiento concéntrico, de este modo ellos están expuestos a un mayor estímulo de remodelación.

Ress y sus colegas (27) utilizaron un método que combina ultrasonido y análisis de movimiento con las medidas simultáneas de fuerza y electromiografía para comparar el estímulo fisiológico del tendón calcáneo durante los dos tipos de contracción muscular. Ellos demostraron que la fuerza pico en el tendón durante el ejercicio excéntrico es de una magnitud similar a la medida durante el ejercicio concéntrico. Esto refuerza la idea de Stanish et al. (35) de que la magnitud de la fuerza aplicada al tendón podría no ser el único factor responsable de las adaptaciones observadas en el

post-entrenamiento excéntrico.

Aunque los resultados in vitro de Rutherford et al. (33) sugieren que el pico de fuerza generado excéntricamente es mayor que el pico de fuerza generado concéntricamente, esto probablemente no se aplica en la situación in vivo. De hecho, el rango articular de movimiento fisiológico permite diferentes cargas mecánicas como aquellas que pueden ser aplicadas durante estudios in vitro. Además, estos autores encontraron un patrón de sobrecarga sinusoidal durante el ejercicio excéntrico que no se observó durante el ejercicio concéntrico (27). Esta fluctuación de fuerza probablemente refleja la dificultad para controlar el movimiento durante el alargamiento muscular activo, una experiencia similar a levantar un gran peso concéntricamente, lo que es más fácil desde la perspectiva del control motriz que bajar el peso excéntricamente. Esta fluctuación de la fuerza sería el estímulo para la remodelación del tendón.

La hipertrofia del tendón patelar observada en el presente estudio es compatible con los resultados de Seynnes et al. (34). Ellos informaron un incremento promedio de 3.7% en el área de sección transversal anatómica del tendón patelar. Con respecto a esto, Reeves et al. (29) no observó un aumento en el área de sección transversal anatómica del tendón patelar en los 9 sujetos que realizaron el entrenamiento de fuerza convencional de 14 semanas. Sin embargo, los autores observaron un incremento en la dureza del tendón, que atribuyeron a un cambio en las propiedades materiales del tendón con el entrenamiento sin cambios en su tamaño.

Este comportamiento hipertrófico diferente puede estar relacionado a la mayor sobrecarga del tendón causada por el entrenamiento excéntrico, dado que la carga de entrenamiento de fuerza convencional está limitada a la carga máxima que se puede levantar de forma concéntrica. Por lo tanto, nuestros resultados parecen ser consistentes con la teoría de que el estrés mecánico como el determinado por el entrenamiento de la fuerza, determina un aumento en la síntesis de proteína en la matriz extracelular de los tendones (21).

Propiedades Mecánicas Musculares

Varios estudios han demostrado que las adaptaciones morfológicas de los músculos esqueléticos, tales como cambios en la longitud de la fibra, llevan a cambios en las propiedades mecánicas del músculo (7,14-16,19). Sin embargo, no es probable que este efecto, cuando es causado por el entrenamiento de la fuerza, represente un cambio en el rango de acción de los fascículos, especialmente desde que Reeves y sus colegas (30, 31) han demostrado que la relación fuerza-velocidad no está influenciada por el entrenamiento de la fuerza utilizando máquinas de entrenamiento de fuerza regulares. Curiosamente, nuestros resultados discrepan con sus observaciones, dado que nosotros observamos un aumento del torque en ambas modalidades de entrenamiento de fuerza, en velocidades angulares concéntricas y excéntricas lo que afecta la relación torque-velocidad.

Reeves y sus colegas (28) observaron que cuando los adultos mayores eran sometidos a entrenamiento excéntrico ellos aumentaron sus torques a las velocidades angulares excéntricas de la relación torque-velocidad, pero no a las concéntricas. Por otro lado, cuando los adultos mayores realizaron el entrenamiento de fuerza convencional, ellos mostraron aumentos del torque sólo a las velocidades angulares concéntricas. Reeves et al. (28) atribuyó estos resultados a la especificidad del entrenamiento de fuerza ejecutado, con énfasis en la parte concéntrica en el entrenamiento convencional y entrenamiento excéntrico exclusivo en el grupo excéntrico de adultos mayores.

CONCLUSIONES

El entrenamiento de fuerza concéntrico y excéntrico realizado en cada miembro inferior produjo cambios estructurales entre-miembros (arquitectura muscular) y de fuerza (torque máximo) similares, con cambios similares en la relación ángulo-torque y torque-velocidad en sujetos ancianos sanos. No obstante, el entrenamiento excéntrico generó un mayor incremento en la fuerza medido por el test de 5RM y un mayor aumento en el área de sección transversal anatómica del tendón patelar. La sobrecarga mecánica producida por la máquina de entrenamiento de fuerza parece ser más importante que el tipo de contracción usada para el entrenamiento de la fuerza en los músculos extensores de rodilla.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a CNPq - Brasil por el apoyo en este estudio.

REFERENCIAS

1. Andriacchi TP, Andersson GB, Fermier RW, Stern D, Galante JO. (1980). A study of lower-limb mechanics during stair-climbing. *J Bone Joint Surg Am.* 1980;62:749-757.
2. Biewener AA, Farley CT, Roberts TJ, Temaner M. (2004). Muscle mechanical advantage of human walking and running: Implications for energy cost. *J Appl Physiol.* 2004;97: 2266-2274.
3. Blazeovich AJ, Cannavan D, Coleman DR, Horne S. (2007). Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *J Appl Physiol.* 2007;103:1565-1575.
4. Blazeovich AJ, Gill ND, Deans N, Zhou S. (2007). Lack of human muscle architectural adaptation after short-term strength training. *Muscle Nerve.* 2007;35:78-86.
5. Bobbert MF, Mackay M, Schinkelshoek D, Huijing PA, van IngenSchenau GJ. (1986). Biomechanical analysis of drop and countermovement jumps. *Eur J ApplPhysiolOccup Physiol.* 1986;54:566-573.
6. Butterfield TA, Herzog W. (2006). The magnitude of muscle strain does not influence serial sarcomere number adaptations following eccentric exercise. *PflugersArchivEur J Physiol.* 2006;451:688-700.
7. Close RI. (1972). Dynamic properties of mammalian skeletal muscles. *Physiol Rev.* 1972;52: 129-197.
8. Eng J. (2003). Sample size estimation: How many individuals should be studied? *Radiology.* 2003;227:309-313.
9. Enoka RM. (1996). Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *J Appl Physiol.* 1996;81:2339-2346.
10. Fang Y, Siemionow V, Sahgal V, Xiong F, Yue GH. (2001). Greater movement-related cortical potential during human eccentric versus concentric muscle contractions. *J Neurophysiol.* 2001;86:1764-1772.
11. Ferri A, Scaglioni G, Pousson M, Capodaglio P, Van Hoecke J, Narici MV. (2003). Strength and power changes of the human plantar flexors and knee extensors in response to resistance training in old age. *ActaPhysiol Scand.* 2003;177:69-78.
12. Fyfe I and Stanish WD. (1992). The use of eccentric training and stretching in the treatment and prevention of tendon injuries. *Clin Sports Med.* 1992;11:601-624.
13. Hansen P, Bojsen-Moller J, Aagaard P, Kjaer M, Magnusson SP. (2006). Mechanical properties of the human patellar tendon, in vivo. *ClinBiomech (Bristol, Avon).* 2006; 21:54-58.
14. Herzog W, Guimaraes AC, Anton MG, Carter-Erdman KA. (1991). Moment-length relations of rectus femoris muscles of speed skaters/cyclists and runners. *Med Sci Sports Exerc.* 1991;23:1289-1296.
15. Herzog W, Kamal S, Clarke HD. (1992). Myofilament lengths of cat skeletal muscle: theoretical considerations and functional implications. *J Biomech.* 1992;25:945-948.
16. Herzog W, Leonard TR, Renaud JM, Wallace J, Chaki G, Bornemisza S. (1992). Force-length properties and functional demands of cat gastrocnemius, soleus and plantaris muscles. *J Biomech.* 1992;25:1329-1335.
17. Herzog W, terKeurs HE. (1988). Force-length relation of in-vivo human rectus femoris muscles. *Pflugers Arch.* 1988;411:642-647.
18. Hortobagyi T, Hill JP, Houmard JA, Fraser DD, Lambert NJ, Israel RG. (1996). Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. *J Appl Physiol.* 1996; 80:765-772.
19. Huijing PA, Nieberg SM, vdVeen EA, Ettema GJ. (1994). A comparison of rat extensor digitorumlongus and gastrocnemius medialis muscle architecture and length-force characteristics. *ActaAnat (Basel).* 1994;149:111-120.
20. Karamanidis K, Arampatzis A. (2006). Mechanical and morphological properties of human quadriceps femoris and triceps surae muscle-tendon unit in relation to aging and running. *J Biomech.* 2006;39:406-417.
21. Kongsgaard M, Reitelseder S, Pedersen TG, Holm L, Aagaard P, Kjaer M, Magnusson SP. (2007). Region specific patellar tendon hypertrophy in humans following resistance training. *ActaPhysiol (Oxf).* 2007;191:111-121.
22. Kubo K, Kanehisa H, Azuma K, Ishizu M, Kuno SY, Okada M, Fukunaga T. (2003). Muscle architectural characteristics in women aged 20-79 years. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35:39-44.
23. Kubo K, Yata H, Kanehisa H, Fukunaga T. (2006). Effects of isometric squat training on the tendon stiffness and jump performance. *Eur J Appl Physiol.* 2006;96:305-314.
24. Lynn R, Talbot JA, Morgan DL. (1998). Differences in rat skeletal muscles after incline and decline running. *J Appl Physiol.* 1998;85:98-104.
25. Macaluso A, De Vito G. (2004). Muscle strength, power and adaptations to resistance training in older people. *Eur J Appl Physiol.* 2004;91:450-472.
26. Nardone A, Romano C, Schieppati M. (1989). Selective recruitment of high-threshold human motor units during voluntary isotonic lengthening of active muscles. *J Physiol.* 1989;409:451-471.
27. Rees JD, Lichtwark GA, Wolman RL, Wilson AM. (2008). The mechanism for efficacy of eccentric loading in Achilles tendon injury; An in vivo study in humans. *Rheumatology (Oxford).* 2008;47:1493-1497.
28. Reeves ND, Maganaris CN, Longo S, Narici MV. (2009). Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans. *Exp Physiol.* 2009; 94:825-833.
29. Reeves ND, Maganaris CN, Narici MV. (2003). Effect of strength training on human patella tendon mechanical properties of older individuals. *J Physiol.* 2003;548:971-981.
30. Reeves ND, Narici MV, Maganaris CN. (2004). Effect of resistance training on skeletal muscle-specific force in elderly humans. *J*

Appl Physiol. 2004;96:885-892.

31. Reeves ND, Narici MV, Maganaris CN. (2004). In vivo human muscle structure and function: Adaptations to resistance training in old age. *Exp Physiol.* 2004;89:675-89.
32. Roig M, O'Brien K, Kirk G, Murray R, McKinnon P, Shadgan B, Reid WD. (2009). The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: A systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2009;43: 556-568.
33. Rutherford OM, Jones DA. (1986). The role of learning and coordination in strength training. *Eur J ApplPhysiolOccup Physiol.* 1986;55:100-105.
34. Seynnes OR, de Boer M, Narici MV. (2007). Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *J Appl Physiol.* 2007;102:368-73.68.
35. Suetta C, Andersen JL, Dalgas U, Berget J, Koskinen S, Aagaard P, Magnusson SP, Kjaer M. (2008). Resistance training induces qualitative changes in muscle morphology, muscle architecture, and muscle function in elderly postoperative patients. *J Appl Physiol.* 2008;105:180-186.
36. Urlando A, Hawkins D. (2007). Achilles tendon adaptation during strength training in young adults. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39:1147-1152.

Versión Digital

<http://g-se.com/es/journals/publico-premium/articulos/efectos-del-entrenamiento-de-la-fuerza-concentrica-versus-excentrica-en-la-estructura-y-funcion-del-extensor-de-rodilla-en-adultos-mayores-2136>