PubliCE, (PubliCE) 2020

Article

Entrenamiento de los Músculos de la Pantorrilla de Baja Intensidad con Restricción del Flujo Sanguíneo Conlleva a Adaptaciones Funcionales y Estructurales Similares que el Entrenamiento de la Fuerza de Baja Carga Convencional: Una Prueba Controlada Aleatorizada

Simon Gavanda[1], Eduard Isenmann[1,2], Yvonne Schlöder[1], Roland Roth[2], Jürgen Freiwald[3], Thorsten Schiffer[4], Stephan Geisler[1] y Michael Behringer[5]

[1]*Department Fitness & Health, IST University of Applied Sciences, Düsseldorf, Germany, Institute of Cardiology and Sports Medicine, German Sport University Cologne, Cologne, Germany*
[2]*Department Fitness & Health, IST University of Applied Sciences, Düsseldorf, Germany Institute of Cardiology and Sports Medicine, German Sport University Cologne, Cologne, Germany*
[3]*Department of Sport Science Movement and Training Science, University of Wuppertal, Wuppertal, Germany*
[4]*Outpatient Clinic for Sports Traumatology and Public Health Consultation, German Sport University Cologne, Cologne, Germany*
[5]*Department Fitness & Health, IST University of Applied Sciences, Düsseldorf, Germany Institute of Sports Sciences, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Frankfurt am Main, Germany*

RESUMEN

El propósito de este estudio fue investigar si un entrenamiento de seis semanas, dos veces por semana (4 series al 30% de 1MR hasta el fallo) con restricción práctica de flujo de sangre (BFR) usando mangas de 7 cm de ancho con un cierre de paso puesto debajo de la rótula es superior a entrenar sin BFR (NoBFR) acerca de la ganancia de masa del músculo y de fuerza en músculos de la pantorrilla. Dos grupos (BFR n = 12, edad promedio 27.33(7.0) años, experiencia de entrenamiento 7.3(7.0) años; NoBFR n = 9, edad promedio 28.9(7.4) años, experiencia de entrenamiento 7.1(6.6) años), se aleatorizaron en un diseño del par emparejado en base a la 1MR inicial, que fue usada para evaluar los efectos en las adaptaciones estructurales y funcionales en varones sanos (volumen de la pantorrilla con un Perómetro [CV], grosor muscular de los gemelos usando ultrasonido [MT], test de 7 saltos máximos para la rigidez de las piernas [LS], 1MR para elevación de pantorrillas en máquina Smith [1MR], y escala analógica visual como medida de la intensidad de dolor [VAS]). El número promedio de repeticiones completado por sesión de entrenamiento durante el período de intervención fue

superior en el grupo de NoBFR comparado al grupo de BFR 70(16) vs 52(9), p = 0.002). La escala VAS medida durante la primera sesión aumentó en ambos grupos similarmente desde la primera a la cuarta serie (p <0.001). No se encontraron efectos de grupo o interacciones de tiempo×grupo para el CV, el MT, el test de LS, y de 1MR. Hubo efectos de tiempo significativos, sin embargo, para el MT (BFR +0.07 cm; NoBFR +0.04; p = 0.008), y para 1MR (BFR +40 kg; NoBFR +34 kg; p<0.001). El test de LS y el CV permanecieron inalterados a través del entrenamiento. La VAS en ambos grupos fue similar, y ambos grupos BFR y NoBFR fueron igualmente eficaces para incrementar la 1MR y el MT en varones entrenados. Sin embargo, el grupo BFR fue más tiempo-eficaz, debido a la menor cantidad de repeticiones por sesión de entrenamiento.

INTRODUCCIÓN

Además de los músculos de los glúteos y de la parte superior de las piernas, los músculos de la pantorrilla tienen un impacto crucial en el rendimiento del sprint y del salto, ya que desarrollan la mayor parte del empuje final, que acelera a un atleta hacia arriba y hacia adelante. En un estudio publicado recientemente, Möck y cols. presentaron correlaciones de medias a fuertes entre la fuerza de una repetición máxima (1MR) en elevaciones de pantorrilla de pie y el rendimiento de sprint (30m) de estudiantes que practican deporte [1]. Sin embargo, vale la pena mencionar que, para mejorar el rendimiento del sprint, el entrenamiento de la fuerza muestra, en promedio, sólo un pequeño efecto (ES = -0.32) [2]. Además, la literatura disponible hasta ahora indica que los músculos de la pantorrilla en general son difíciles de entrenar. Estudios anteriores han demostrado poca o ninguna mejora de los músculos de la pantorrilla en términos de hipertrofia y ganancias de fuerza [3]. Un meta-análisis sobre este tema mostró que el tamaño del efecto de la hipertrofia en todos los estudios y métodos de entrenamiento (entrenamiento de la fuerza [EF] y estimulación eléctrica neuromuscular) era pequeño (Hedges g = 0.30; intervalo de confianza del 95%: 0.01–0.59; p = 0,05; modelo de efectos aleatorios) [4]. Esto es apoyado por Trappe y cols. [3], quienes informaron que los músculos de la pantorrilla presentan una menor respuesta de síntesis de proteína muscular en comparación con el vasto lateral después de tres ejercicios diferentes de pantorrilla, que se realizaron durante 4 series de 15 repeticiones al 70% de 1MR. Sin embargo, los mecanismos subyacentes para esto siguen sin estar claros.

Con el fin de lograr adaptaciones musculares en el sentido de la hipertrofia muscular y del aumento de la fuerza, durante mucho tiempo se supuso que había que superar resistencias moderadas a altas. Sin embargo, investigaciones recientes indican que la tensión mecánica a través de la carga no es la única forma de lograr estas adaptaciones [5]. Una opción alternativa puede ser la aplicación de un estrés metabólico, causado por la acumulación de varios metabolitos que se puede lograr a bajas intensidades con altas tasas de repeticiones y de fatiga muscular. Sin embargo, este estímulo de entrenamiento ocurre mucho antes si se reduce el suministro de sangre a los músculos activos y se previene el reflujo venoso. La efectividad de este método de entrenamiento, conocido como entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR), ya se ha demostrado en innumerables estudios [6]. Los meta-análisis indican que los efectos alcanzables en términos de fuerza muscular son algo menores y los efectos de la hipertrofia muscular son comparables a lo que se pueden esperar del EF de alta intensidad [7].

Se puede suponer que, con base en hallazgos previos, que el estímulo de entrenamiento aplicado en forma de EF clásico no fue óptimo para lograr la hipertrofia muscular de la musculatura de la pantorrilla. El estrés metabólico puede ser más adecuado. La investigación también demuestra que el EF de los músculos de la pantorrilla con BFR es capaz de aumentar la capacidad de filtración microvascular [8]. En combinación con un entrenamiento altamente intensivo, el entrenamiento con BFR logra una mejor resistencia a la fatiga, una regeneración más rápida y un mejor consumo de oxígeno durante el ejercicio después de sólo una semana [9]. Sin embargo, aún faltan datos sobre si el EF de baja intensidad con BFR puede aumentar la fuerza y la masa muscular.

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue investigar si un EF de baja intensidad de seis semanas con BFR es superior al EF sin BFR para inducir ganancias de masa muscular y de fuerza, cuando es realizado al fallo muscular voluntario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño

Se usó un diseño de pares igualados aleatorios de dos grupos, basado en el 1MR inicial, para evaluar los efectos de un EF con BFR de baja intensidad de seis semanas o un EF convencional de baja intensidad de los músculos de la pantorrilla (NoBFR) sobre adaptaciones estructurales y funcionales. Las variables independientes en este estudio consistieron en dos modalidades de entrenamiento diferentes (BFR y NoBFR) y seis variables dependientes: volumen de la pantorrilla, grosor del músculo gastrocnemio, rigidez de las piernas y test de 1MR del ejercicio elevación de la pantorrilla, así como una evaluación del dolor durante la primera sesión de entrenamiento.
Antes de la investigación, se obtuvo la aprobación del comité de ética de la Universidad IST de Ciencias Aplicadas de acuerdo con la Declaración de Helsinki.

Sujetos

El software G*Power (3.1.9.2, Universität Düsseldorf, Alemania) se utilizó de antemano para determinar el tamaño de la muestra necesaria mediante análisis de potencia utilizando un tamaño de efecto medio ($f = 0.25$; $\alpha = 0.05$; $1-\beta = 0.80$) [10] . Para dar cuenta de posibles abandonos, se reclutaron treinta participantes en un gimnasio comercial local. Los criterios de inclusión fueron los siguientes: hombre, de 18 a 45 años de edad, experiencia de EF de al menos dos años, sin uso de suplementos nutricionales o drogas ilegales (es decir, esteroides anabólicos), y sin trastornos respiratorios, cardiovasculares o musculoesqueléticos existentes. Un sujeto no cumplió con los criterios de inclusión médica y fue excluido antes del estudio. Todos los participantes fueron informados sobre el procedimiento del estudio y de los métodos a utilizar, así como sobre los riesgos potenciales, y dieron su consentimiento informado por escrito antes del inicio de la intervención. Los sujetos acordaron abstenerse de cualquier EF adicional de la pantorrilla durante el curso del estudio. Además, para minimizar los posibles resultados de la confusión en la dieta, se les pidió a los sujetos que mantuvieran su dieta normal durante todo el estudio.

METODOLOGÍA

Pre-evaluación

Para cada sujeto, las pruebas previas y posteriores se realizaron a la misma hora del día. Durante la prueba previa, el historial de entrenamiento de los sujetos se evaluó mediante un cuestionario. Posteriormente, se midió la masa corporal usando una balanza electrónica (Seca 803; Seca GmbH & Co. KG, Hamburgo, Alemania) y el volumen total de la pantorrilla (CV), como una medida indirecta de la hipertrofia, se calculó usando PeroPlus (Pero-System Messgeräte GmbH, Wuppertal, Alemania) a partir de una serie de mediciones del diámetro vertical y horizontal tomadas por un dispositivo optoelectrónico (Perometer 350 NT; Pero-System Messgeräte GmbH, Wuppertal, Alemania) [11]. Se ha informado que el error de medición en el mismo día es del 4,3% [11]. Los sujetos se sentaron en una silla con la pierna derecha completamente extendida y relajada en el medio del marco de la medición, mientras el pie se colocaba en el reposapiés del dispositivo. El marco de medición se movió proximalmente a lo largo del riel del dispositivo desde la posición más inferior sobre la rodilla del sujeto.

El grosor muscular (MT) del gastrocnemio medial de la parte inferior de la pierna derecha, como medida directa para la hipertrofia del músculo esquelético, fue medida utilizando ultrasonido en modo B (Mindray DP-50, Mindray Medical International Ltd, Shenzhen, China) con sonda lineal de 8,5 MHz. (Mindray 75L53EA, Mindray Medical International Ltd, Shenzhen, China). El ultrasonido se considera una medida válida para los cambios del grosor muscular en comparación con otras técnicas, como la resonancia magnética o la tomografía computarizada [12,13]. Para las imágenes, los participantes se colocaron en una posición boca abajo en la mesa de examen, con las rodillas completamente extendidas y los pies colgando sobre el borde de la mesa. Se aplicó un gel soluble en agua y el cabezal de exploración se colocó perpendicular al eje largo del vástago a una distancia del 30% entre el pliegue poplíteo y el maléolo lateral, en el punto más prominente del vientre muscular [14]. El mismo investigador registró dos imágenes para cada sujeto sin depresión del tejido subyacente (ganancia = 50 dB; profundidad de la imagen = 4,6 cm). Se midió el MT, definido como la distancia entre la aponeurosis profunda y la superficial, y se usó el valor medio de ambas mediciones para una evaluación adicional.

Posteriormente, para precalentar, los participantes completaron cinco minutos de carrera de baja intensidad en cinta. La rigidez de la pierna (LS) se evaluó utilizando el sistema de fotocélulas Optojump (Microgate Srl, Bolzano, Italia) [15]. Para el sistema Optojump, se ha informado previamente de un error estándar de medición que oscila entre 1,8 y 2,1 kN/m [15]. Los participantes completaron tres pruebas del test de 7 saltos máximos, con dos minutos de descanso entre las pruebas. La primera prueba sirvió como un calentamiento específico de la tarea; sólo se documentaron el segundo y el tercer testeo. Los sujetos recibieron instrucciones de saltar lo más alto posible con las manos en las caderas y un tiempo mínimo de contacto con el suelo. Si los sujetos no lograron alcanzar tiempos de contacto con el suelo inferiores a 200 ms, el intento se repetía hasta que se obtenían dos pruebas válidas, pero no más de dos veces. Todas las pruebas se realizaron sin zapatillas

o medias en el piso del gimnasio. Los tiempos medios de vuelo y de contacto con el suelo de todos los saltos de una única prueba válida, junto con la masa corporal del sujeto, se tomaron para calcular la LS utilizando la fórmula propuesta por Ruggiero y cols. [15]. Los valores medios de ambas pruebas se documentaron para una evaluación adicional.

Después de cinco minutos de descanso, se realizó el ejercicio de elevación de pantorrillas usando una máquina Smith (Life Fitness Inc, Rosemont, Illinois, Estados Unidos). Los participantes fueron colocados con el antepié en un escalón y la barra descansando sobre su cuello. La máxima flexión plantar del tobillo con una barra sin peso se midió utilizando un goniómetro. Se realizaron series de calentamiento de 10, 5, 3 y 1 repeticiones utilizando 50, 65, 80 y 90% de los valores de 1MR estimados de los participantes, intercalados con 1, 2, 3 y 4 minutos de descanso respectivamente [16]. Posteriormente, se determinó el test de 1MR aumentando la carga hasta que los sujetos llegaban al fallo, con cuatro minutos de descanso entre los intentos. Las repeticiones sólo eran válidas si se alcanzaba el rango de movimiento medido previamente. Durante todas las pruebas máximas, el investigador dio un fuerte estímulo verbal.

Después del pre-test, todos los sujetos completaron 2 series de 10 repeticiones, una con y otra sin BFR, utilizando el 30% de su 1MR para familiarizarse con ambas modalidades de entrenamiento. Para BFR, se utilizó un enfoque práctico [17], utilizando mangas de 7 cm de ancho con un cierre giratorio (mybimaxx GmbH, Kirchheim unter Teck, Alemania). Se colocaron manguitos para BFR debajo de la rótula de ambas piernas y se apretaron al máximo (hasta que no fuera posible girar la cerradura) para restringir el flujo sanguíneo venoso y reducir el flujo de entrada arterial. Las mediciones tomadas antes del inicio de este estudio mostraron que este procedimiento conduce a una reducción del flujo sanguíneo arterial del 59,76% (5,75) en hombres jóvenes (para más detalles, ver la S1 Tabla). Después de completar todas las pruebas preliminares, los participantes fueron asignados aleatoriamente al grupo de intervención BFR (n = 15) o NoBFR (n = 14), en función de su 1MR inicial

Intervención

El experimento se realizó de octubre de 2018 a diciembre de 2018. La intervención duró seis semanas y consistió en un ejercicio de pantorrilla en dos días no consecutivos de la semana (mínimo 48 y máximo 96 horas de diferencia) además del régimen de entrenamiento habitual de los sujetos. Todas las sesiones de entrenamiento fueron supervisadas por uno de los investigadores. Después de cinco minutos de correr en una cinta a baja intensidad, los sujetos completaron cuatro series de ejercicio de elevación de pantorrillas de pie, como se describe en la sección de prueba previa, con el 30% de su 1MR previa a la intervención en un ROM completo al fallo muscular concéntrico, con o sin BFR, según su grupo asignado. El fallo muscular concéntrico se definió como la incapacidad para alcanzar el ROM completo, que era controlado por un investigador durante cada serie utilizando un goniómetro. En el grupo BFR, las mangas se colocaron y cerraron antes de la primera serie, como se describió anteriormente en la sección de testeo previo, y no se aflojaron ni se quitaron durante los períodos de descanso hasta que se completó la cuarta serie. Los períodos de descanso entre las series para ambos grupos se establecieron en 30 segundos. La cadencia de cada repetición se estableció como excéntrica de 2 segundos y concéntrica de 2 segundos, sin retención isométrica en la parte superior o inferior de cada repetición. Esto fue monitoreado a través de la aplicación móvil Pro Metronome (Xanin Technology, Berlín, Alemania). El número de repeticiones de todas las series durante cada sesión de entrenamiento se documentó en un registro de entrenamiento. El dolor se evaluó después de cada serie durante la primera sesión de la intervención usando la Escala Visual Analógica (VAS), según lo descrito por Heller y cols. [18].

Todos los sujetos debían asistir al menos a 9 de las 12 sesiones de entrenamiento (75% de adherencia) para ser incluidos para el análisis. Si los participantes se perdían dos sesiones seguidas o más de tres en total, eran eliminados del estudio. Durante la intervención, ocho sujetos perdieron más de tres sesiones de entrenamiento y fueron eliminados para su posterior análisis (razones de salud n = 5, razones personales n = 3). Ninguno de los sujetos resultó herido durante las sesiones de EF.

Post-testeo. Los testeos posteriores tuvieron lugar al menos tres días y no más de cinco días después de la última sesión de entrenamiento. Todos los procedimientos fueron idénticos a las pruebas previas. Todos los investigadores que realizaron las evaluaciones desconocían la asignación del grupo de intervención de los sujetos. Los datos de 21 sujetos que finalizaron el estudio se incluyeron para el análisis. Consulte la Tabla 1 para obtener más información sobre ambos grupos.

Tabla 1. *Características iniciales de grupo.*

	BFR (n = 12)	NoBFR (n = 9)
Age (y)	27.33 (7.0)	28.9 (7.4)
Height (cm)	182.3 (5.0)	185.0 (7.8)
Body mass (kg)	82.6 (6.0)	83.9 (11.6)
RT experience (y)	7.3 (7.0)	7.1 (6.6)

RT = resistance training; BFR = blood flow restriction training; NoBFR = no blood flow restriction training.

Los valores se muestran como una media (desviación estándar).
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235377.t001

Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron con SPSS (versión 25; IBM Corp, Chicago, IL). Los datos se probaron para la distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de la varianza mediante la prueba de Levene. Los datos se presentan como medias (SD). El análisis de varianza unidireccional (ANOVA) se utilizó para evaluar las diferencias iniciales entre los grupos. Se utilizó un ANOVA de 2×2 (tiempo × grupo) para determinar las diferencias en CV, MT, LS y 1MR. Además, se utilizó un ANOVA de medidas repetidas 5x2 (tiempo x grupo) para analizar la interacción de los valores de VAS a través del tiempo y del grupo. Se realizó un test-*t* de muestras independientes para comparar el número medio de repeticiones completadas por los sujetos por sesión de entrenamiento en ambos grupos. Se usó un test-*t* de pares, para detectar diferencias en el número total de repeticiones en las sesiones de EF 1 y 11. La sesión de EF 12 no se usó para el análisis ya que varios sujetos se perdieron esta sesión. Cuando fue necesario, se realizó un análisis *post-hoc* de Bonferroni (ajustado por error tipo I). Los tamaños del efecto dentro del grupo (ES) se calcularon según lo sugerido por Dankel y Loenneke utilizando la siguiente fórmula: puntaje de cambio medio/SD del puntaje de cambio medio [19]. La puntuación de cambio se calculó como el valor posterior a la prueba menos el valor previo a la prueba para cada participante.

Además, se calcularon los intervalos de confianza del 95% (95% CI) para las diferencias medias y los cambios porcentuales medios. La significación estadística se definió como $p \leq .05$. Las estimaciones de los coeficientes de correlación intraclase (ICC) se calcularon en base a un modelo de efectos aleatorios bidireccionales de media-calificación (k = 2), de acuerdo absoluto, para MT y LS.

Resultados

La diferencia media entre las 50 medidas repetidas de MT en todos los participantes, independientemente de la asignación del grupo, fue de 0.001 cm (0.05) y -0.64 kN/m (2.95) para LS. Se encontró un alto grado de confiabilidad de la medición. La medida media de ICC fue 0.984 para MT y 0.941 para LS, respectivamente. Los participantes en el grupo BFR asistieron a una media de 11.67(0.49) de 12 sesiones de entrenamiento posibles y en el grupo NoBFR 11.67(0.50), respectivamente. Entre las sesiones 1 y 11 de EF, el grupo BFR aumentó el número total de repeticiones en todas las series de 46(7) a 59(14) (p = 0.006), mientras que en el grupo NoBFR no hubo cambios significativos (p = 0.318; EF sesión 1:71(22); sesión EF 2:79(19). El número promedio de repeticiones completadas por sesión de entrenamiento fue significativamente mayor en el grupo NoBFR (70(16)) en comparación con el grupo BFR (52(9)) (p = 0,002).

No hubo interacción tiempo x grupo (p = 0.834), ni efecto de grupo (p = 0.447) en la VAS. Sin embargo, se observó un efecto de tiempo (p <0,001) (ver Figura 1). La VAS en el grupo BFR después de las series 1, 2, 3 y 4 fue 0.6(1.0), 3.8(2.3), 5.3(2.0) y 6.3(2.2), respectivamente. Los sujetos del grupo NoBFR informaron valores de VAS de 0.0(0.1), 3.1(1.7), 4.0(1.9) y 5.6(2.2).

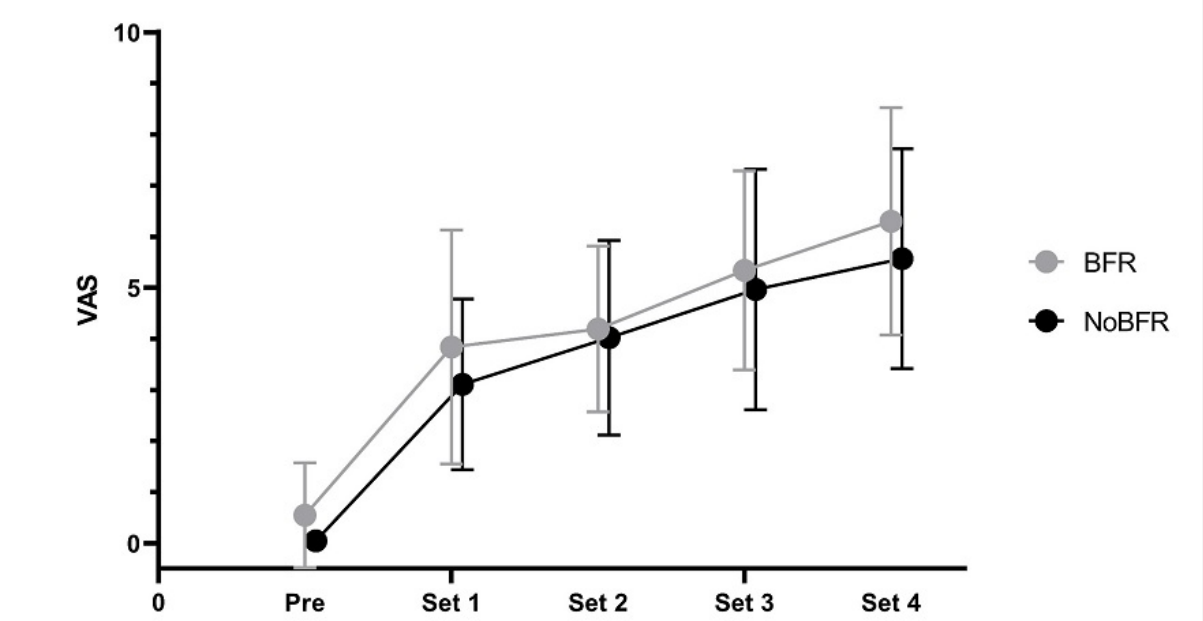


Figura 1. *Valores promedio de percepción del dolor usando una Escala Visual Analógica (VAS) desde el pre-entrenamiento a lo largo de cuatro series de entrenamiento de la musculatura de la pantorrilla de baja intensidad con restricción de flujo sanguíneo (BFR) o entrenamiento convencional de baja intensidad de la musculatura de la pantorrilla (NoBFR) hasta el fallo.*
Las barras de error representan desviaciones estándar
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235377.g001

Todos los demás resultados se resumen en la Tabla 2. No hubo diferencias significativas entre los grupos para ninguna medición al inicio del estudio. No se encontraron interacciones tiempo × grupo. Un análisis posterior no mostró efectos significativos de grupo (CV, MT, LS, 1MR), pero sí de tiempo para MT y 1MR. El grupo BFR aumentó el MT de 2,13 cm (0,33) a 2,20 cm (0,39). Este es un aumento medio de 0.07 cm (ES = 0.61; IC 95%: 0.00–0.14 cm). En comparación, hubo un cambio en la media de +0.04cm en el grupo NoBFR (PRE 2.06 cm (0.21); POST 2.10 cm (0.20); ES = 0.40; IC 95%: -0.03–0.11 cm). Los cambios medios e individuales se pueden ver en la Figura 2.

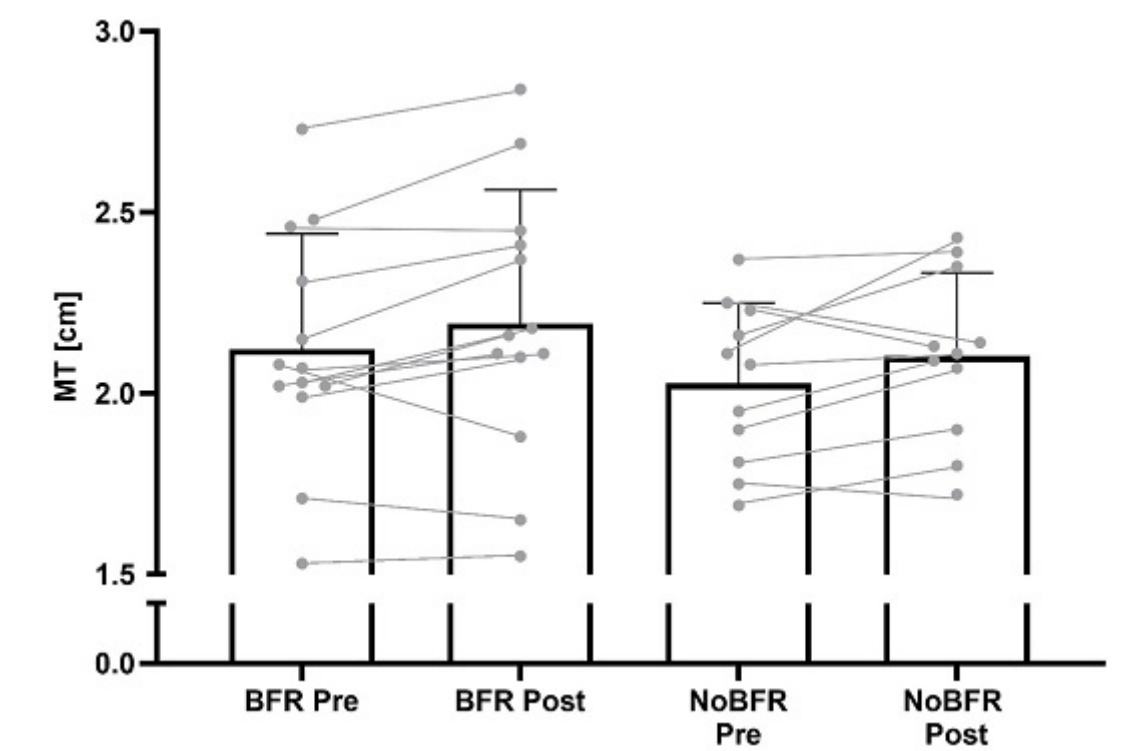


Figura 2. *Cambios promedio e individuales del grosor del músculo gastrocnemio antes y después del entrenamiento de fuerza con restricción del flujo sanguíneo (BFR) o sin restricción (NoBFR).*
Las barras de error representan desviaciones estándar.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235377.g002

Tabla 2. *Mediciones previas/posteriores a los Tests, cambio relativo, tamaños del efecto, así como interacciones de grupo por tiempo, efectos de grupo y tiempo.*
Los valores se muestran como una media (desviación estándar).
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235377.t002

	Group	Pre	Post	Mean change score	ES	group * time	group	time
CV [ml]	BFR	3526 (572)	3552 (594)	26 (86)	0.31	0.138	0.686	0.883
	NoBFR	3658 (604)	3631 (564)	-28 (80)	-0.35			
MT [cm]	BFR	2.13 (0.33)	2.20 (0.39)	0.07 (0.12)	0.61	0.926	0.530	0.008**
	NoBFR	2.06 (0.21)	2.10 (0.20)	0.04 (0.11)	0.40			
LS [kNn/m]	BFR	37.42 (5.80)	35.20 (4.52)	-2.21 (5.01)	-0.44	0.201	0.154	0.165
	NoBFR	32.49 (6.64)	32.64 (6.60)	0.15 (3.82)	0.04			
1-RM [kg]	BFR	163 (37)	203 (42)	40 (22)	1.80	0.428	0.852	< 0.001***
	NoBFR	163 (34)	197 (34)	34 (14)	2.50			

CV = calf volume; MT = muscle thickness; LS = leg stiffness; 1-RM = one-repetition maximum; BFR = blood flow restriction training; NoBFR = no blood flow restriction training.
**p<0.01,
***p<0.001

El grupo BFR mejoró su 1MR de 163(37) kg a 203(42) kg, y el grupo NoBFR de 163(34) kg a 197(34) kg. Esto equivale a un aumento promedio de 1MR de 40 kg en el grupo BFR (ES = 1.80; 95% CI: 28-53 kg) y de 34 kg en el grupo NoBFR, respectivamente (ES = 2.50; 95% CI: 28-46 kg). Los cambios medios e individuales se pueden encontrar en la Figura 3.

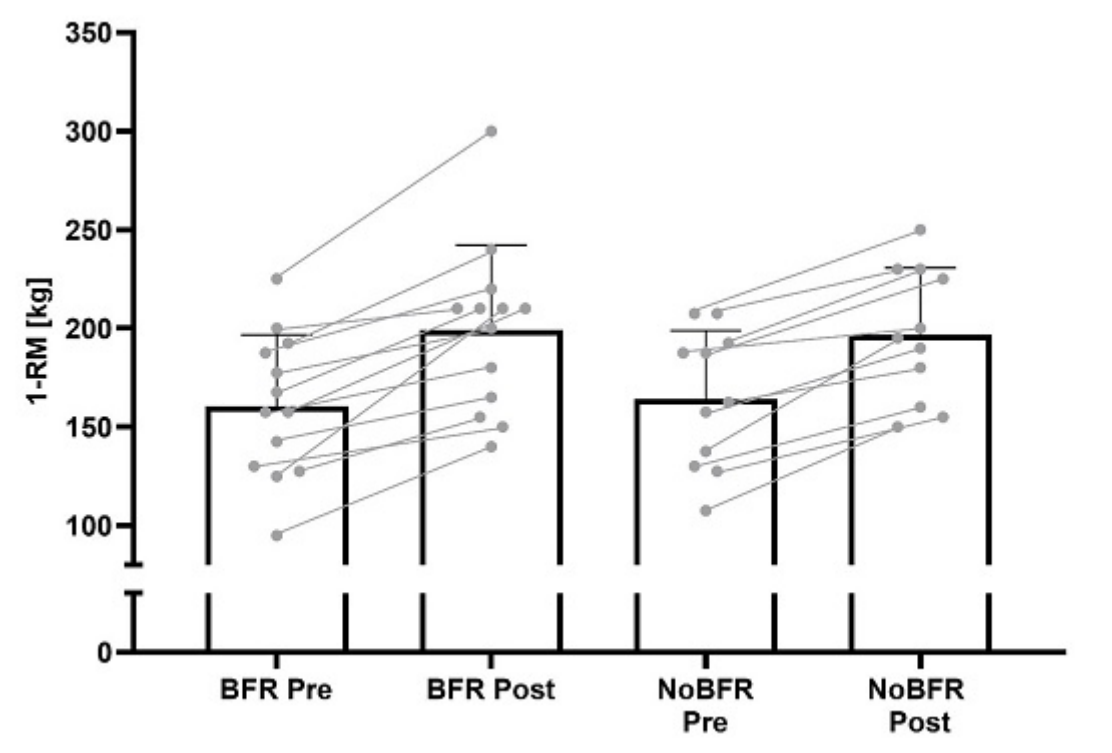


Figura 3. *Cambios promedio e individuales del test de una repetición máxima del ejercicio de elevación de pantorrillas de pie pre- y post-, con restricción del flujo sanguíneo (BFR) o sin restricción (NoBFR).*
Las barras de error representan desviaciones estándar.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235377.g003

Discusión

El objetivo de este estudio fue investigar si el EF de baja intensidad con BFR es superior al EF sin BFR para aumentar la fuerza muscular y el grosor de la pantorrilla en sujetos entrenados. No pudimos demostrar ninguna diferencia entre los grupos de entrenamiento. En BFR y NoBFR, los cambios en 1MR y en MT fueron evidentes. Este estudio demuestra que los músculos de la pantorrilla son, de hecho, entrenables en términos de fuerza e hipertrofia.

Aumentos significativos en 1MR fueron visibles en ambos grupos (BFR, ES = 1.80; NoBFR, ES = 2.50) de 24.80% en el grupo BFR y de 20.95% en el grupo NoBFR, respectivamente. Hay estudios que muestran un aumento menor de la fuerza del extensor de rodilla a través de protocolos de EF con BFR de baja carga comparables (30% de 1MR) al fallo. Por ejemplo, Clark y cols. [20] y Ellefsen y cols. [21] mostraron un aumento en 1MR de solo 8% en cuatro semanas de FE y del 10% después de doce semanas, respectivamente. Sólo los estudios que utilizan protocolos no al fallo, mostraron resultados comparativamente altos del 19% [22] y 21% de ganancia de fuerza [23], respectivamente. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que diferentes protocolos (por ejemplo, protocolos de repeticiones igualadas o protocolos al fallo) y ejercicios (por ejemplo, extensión de rodilla, press de piernas) conducen a diferentes adaptaciones; Es importante tener esto en cuenta al comparar estudios previos con los resultados del protocolo de EF para las pantorrillas utilizados en este estudio. No obstante, los resultados en este estudio son más altos que el ES del EF con BFR de baja carga para distintos músculos de las pantorrillas, descrito en un meta-análisis de Loenneke y cols. [24]. Sin embargo, las comparaciones del ES deben realizarse con extrema precaución, ya que los investigadores usan diferentes tipos de ES o no proporcionan información precisa sobre cómo se calcularon [25]. Si el aumento en la fuerza resultó principalmente a partir de adaptaciones estructurales en lugar de neuronales requiere una investigación más a fondo. En general, se ha sugerido que se esperan mayores ganancias de fuerza cuando se usan intensidades y frecuencias más altas e intervenciones de EF con BFR más duraderas [6]. Por lo tanto, se necesitan estudios que comparen diferentes modalidades y combinaciones de intensidades (por ejemplo, EF de alta carga vs EF con BFR de baja carga, EF de alta carga vs EF con BFR de alta carga).

El EF con BFR de baja intensidad y EF NoBFR resultaron en cambios del MT, incluso después de sólo seis semanas (BFR, ES = 0.61; NoBFR, ES = 0.40). El cambio relativo del cambio promedio fue 3.29% de ganancia en el grupo BFR y 1.94% en el grupo NoBFR. Otros estudios sobre hipertrofia después de un EF con BFR de baja intensidad (20-30% 1MR) de los cuádriceps mostraron resultados ligeramente más altos (entre 6 y 7%) [26,21,27]. Sin embargo, la duración de los períodos

de EF fue sustancialmente mayor en estos estudios (8-12 semanas), mientras que se utilizaron intensidades más bajas en comparación con este estudio. Además, sólo Ellefsen y cols. [21] utilizaron un protocolo de EF hasta el fallo. Por lo tanto, es difícil comparar estos resultados. Con respecto al EF de la pantorrilla en general, también es difícil comparar resultados, ya que los estudios utilizaron una variedad de métodos de entrenamiento, así como diferentes esquemas de repeticiones, intensidades, series y duraciones de intervención utilizadas. Por ejemplo, Weiss y cols. [28] utilizaron cuatro series de 9 a 13 repeticiones tres veces por semana durante ocho semanas, mientras que los sujetos de Kubo y cols. [29] entrenaron con cinco series de 10 repeticiones al 80% de 1MR cuatro veces por semana durante doce semanas. Sin embargo, es notable que en este estudio el crecimiento muscular pueda detectarse después de sólo seis semanas de EF. Sin embargo, dado que Slysz y cols. [6] informaron mayores ganancias de MT en estudios que duraron ocho semanas o más, se necesitan más estudios sobre el EF en la musculatura de las pantorrillas con períodos de intervención más largos.

El CV se mantuvo sin cambios en ambos grupos. Esto es sorprendente, ya que los cambios significativos en MT estaban presentes. También vale la pena señalar que los cambios del CV fueron más pequeños que el error de medición habitual del dispositivo [11]. Esto podría explicar la actual discrepancia de los resultados. Hasta donde sabemos, el Perómetro nunca se ha utilizado para determinar el crecimiento muscular. Por lo tanto, los estudios que evalúan la idoneidad del Perómetro para este propósito son deseables, ya que la medición toma sólo unos segundos y podría ser una valiosa adición a los métodos existentes, como el ultrasonido.

Los tests de LS son un procedimiento comúnmente utilizado para caracterizar la función del ciclo de estiramiento-acortamiento (SSC) [30], que desempeña un papel vital en tareas atléticas como correr o saltar. Y, dado que el LS depende principalmente de la rigidez del tobillo [31], y la rigidez del tobillo depende en parte de las propiedades del tendón de Aquiles [32], se seleccionó el tests de 7 saltos máximos para obtener indirectamente información sobre las adaptaciones del tendón de Aquiles para el EF con BFR de baja intensidad o EF con NoBFR. Aunque el dispositivo Optojump subestima el LS en comparación con el estándar de oro (sistema de captura de movimiento 3D en combinación con una plataforma de fuerza) se considera una prueba de campo confiable para LS [15]. Sin embargo, nuestros resultados no muestran diferencias en el LS después de la intervención. Esto está en línea con investigaciones anteriores, que muestran que el entrenamiento con BFR de baja carga no fue suficiente para provocar cambios en la rigidez del tendón [26].

Por lo tanto, para los atletas que no sólo quieren ganar MT y fuerza a través del EF, el entrenamiento con BFR de baja intensidad no fue considerado ideal, porque el aumento desproporcionado de la fuerza a través del EF con BFR con poca o ninguna adaptación del tendón podría conducir a un desequilibrio desfavorable de la capacidad de generación de fuerza y las propiedades mecánicas del tendón, lo que se considera un factor de riesgo para las tendinopatías [33].

Sin embargo, en contraste con Kubo y cols. [26], una investigación más reciente encontró incrementos comparables en la rigidez del tendón de Aquiles y el área transversal después del EF con BFR de baja carga (20–35% 1MR) en comparación con un protocolo de alta carga (70–85% 1MR) [34]. Esto es sorprendente, ya que se pensaba anteriormente, que con respecto a las adaptaciones de los tendones en general, el EF de carga más alta es más efectiva que la EF de baja intensidad para aumentar la rigidez del tendón. Además, la literatura sugiere que se requieren 12 semanas o más para que se realicen las adaptaciones tendinosas [35]. Esto podría explicar por qué Centner y cols. [34] con su estudio que abarca 14 semanas pudieron mostrar diferencias en la rigidez del tendón, mientras que el presente estudio que sólo duró seis semanas no pudo. También se debe tener en cuenta que el test de LS utilizado en el presente estudio sólo permite extraer conclusiones indirectas sobre el tendón de Aquiles y que los cambios en LS (-2.21 kN/m en BFR; 0.15 kN/m en NoBFR) estuvieron aproximadamente en el rango del error de medición de 1.8–2.1 kN/m informado anteriormente [15]. Por lo tanto, se necesitan más estudios sobre las adaptaciones tendinosas después del EF con BFR de baja intensidad a largo plazo, medidos por técnicas directas como la ecografía.

El VAS del dolor aumentó significativamente en ambos grupos desde el inicio hasta la cuarta serie. Esto está en línea con investigaciones previas [36]. Sin embargo, puede haber diferencias al comparar el EF con BFR de baja intensidad con EF NoBFR o EF de alta intensidad, que no se realiza al fallo muscular [37]. Sin embargo, esto también requiere más investigación.

El número de repeticiones completadas en una sola sesión aumentó en el grupo BFR con el tiempo (de 46(7) a 59(14)). Se puede suponer que, a través de un volumen de repeticiones más alto, se respetó el principio de sobrecarga progresiva y condujo a un estímulo de entrenamiento suficiente, incluso después de seis semanas. Sin embargo, en el grupo NoBFR sólo hubo una tendencia hacia mayores repeticiones por sesión (71(22) a 79(19)). No obstante, las adaptaciones fueron bastante idénticas en ambos grupos. Si las diferencias estarían presentes después de períodos de intervención más largos, no lo sabemos y necesita más investigación. El número promedio de repeticiones completadas por los sujetos por sesión de entrenamiento fue significativamente mayor en el grupo NoBFR (70(16) vs 52(9)), pero en el rango habitual de este tipo de entrenamiento [38]. Esto está en línea con trabajos anteriores, mostrando un volumen de repeticiones más bajo en condiciones de EF con BFR en comparación con EF NoBFR [39,40].

Un punto fuerte de este estudio es la inclusión de sujetos entrenados en EF solamente. Esto hace que los resultados sean más aplicables para poblaciones con base en EF más duraderos. Sin embargo, los sujetos entrenados tienen menos potencial de adaptación [41]. No obstante, esto subraya la importancia de nuestros resultados, ya que incluso los participantes entrenados mostraron mejoras en la fuerza de la pantorrilla y el MT a través del EF de baja intensidad, independientemente de con o sin BFR. Debe mencionarse que no hubo un grupo de control de no ejercicio con el mismo tiempo, especialmente porque a los sujetos se les permitió realizar un entrenamiento adicional. Esto puede haber influido también en la adaptación de las pantorrillas. Por lo tanto, es posible que la liberación sistémica resultante de hormonas y factores de crecimiento conduzca a un aumento adicional del MT [42]. Sin embargo, en una revisión reciente sobre el papel de las hormonas en el EF, los autores concluyen que las elevaciones hormonales agudas pueden tener, en el mejor de los casos, un impacto menor en la hipertrofia [43]. En opinión de los autores, un cese completo del entrenamiento adicional de los sujetos habría sido una mayor fuente de sesgo debido a los efectos del desentrenamiento. Además, estaría lejos de la práctica del entrenamiento normal llevar a cabo estudios en los que sólo se permita entrenar a las pantorrillas. También debe mencionarse que los hábitos alimenticios no fueron regulados ni documentados. Dado que la nutrición puede influir en el crecimiento muscular, los estudios futuros deberían considerar controlar la dieta. Otra limitación pueden ser los brazaletes o manguitos de BFR utilizados. La literatura actual recomienda 50 a 80% de la presión requerida para ocluir completamente el flujo arterial durante el entrenamiento con BFR de baja intensidad [38]. Los brazaletes utilizados en este estudio indujeron una reducción media del 59,76% (5,75) del flujo sanguíneo arterial, lo que está en línea con la recomendación antes mencionada. Por lo tanto, los manguitos utilizados en este estudio parecen apropiados para el EF con BFR y más prácticos en comparación con otros dispositivos de presión especializados más caros.

En conclusión, el EF con BFR y EF NoBFR conducen a mejoras de 1MR y de MT en hombres entrenados con EF. El LS y el CV, sin embargo, se mantuvieron sin cambios. Los valores del VAS del dolor en ambos grupos fueron similares. Por estas razones, se puede afirmar que el entrenamiento de la pantorrilla con EF con BFR es superior al EF NoBFR, ya que conduce a resultados similares pero con menos tiempo, debido a que se requieren menos repeticiones para completar una serie hasta el fallo muscular concéntrico. Los estudios futuros deben considerar participantes más jóvenes y mayores, entrenados y no entrenados, así como mujeres de todas las edades. Además, los investigadores deberían considerar el uso de un grupo de control de tiempo similar, períodos de intervención más largos con diferentes frecuencias de EF e intensidades de entrenamiento. La investigación adicional sobre las estrategias de la periodización del EF, que incluyen un EF tradicional de alta intensidad, así como EF con BFR de baja carga sobre medidas de fuerza, hipertrofia y rendimiento deportivo también sería una contribución valiosa sobre el tema.

Información de apoyo

S1 Tabla. Reducción media de la velocidad del flujo sanguíneo arterial de la arteria tibial anterior con o sin manguito de BFR en hombres jóvenes sanos (29(3,05) años).

Se usaron cuatro latidos para determinar la media de la TA mediante ecografía Doppler (SonoSCape P20 con sonda SonoScape L742, SonoScape Europe S.r.l., Roma, Italia). Cada condición se midió tres veces y se calculó la media. El manguito BFR de 7 cm de ancho con un cierre giratorio (mybimaxx GmbH, Kirchheim unter Teck, Alemania) se colocó debajo de la rótula de la pierna izquierda y se apretó al máximo. La diferencia entre "TA media sin manguito" y "TA media con manguito" en porcentaje equivalía a la reducción resultante en la velocidad del flujo sanguíneo arterial. BFR = entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo; TA = Tiempo promedio de velocidad del flujo sanguíneo arterial.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235377.s001

Agradecimientos

Estamos profundamente agradecidos por cada participante involucrado en este proyecto y por los esfuerzos y el arduo trabajo que han puesto en él.

Financiación: los autores no recibieron financiación específica para este trabajo.
Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

REFERENCIAS

1. Möck S, Hartmann R, Wirth K, Rosenkranz G, Mickel C (2018). Correlation of dynamic strength in the standing calf raise with sprinting performance in consecutive sections up to 30 meters. *Research in sports medicine 26 (4).: 474–481. pmid:29963928*
2. Rumpf MC, Lockie RG, Cronin JB, Jalilvand F (2016). Effect of Different Sprint Training Methods on Sprint Performance Over

Various Distances. *A Brief Review. Journal of strength and conditioning research 30 (6).: 1767–1785. pmid:26492101*
3. Trappe TA, Raue U, Tesch PA (2004). Human soleus muscle protein synthesis following resistance exercise. *Acta physiologica Scandinavica 182 (2).: 189–196. pmid:15450115*
4. Behringer M, Moser M, Montag J, McCourt M, Tenner D et al. (2015). Electrically induced muscle cramps induce hypertrophy of calf muscles in healthy adults. *Journal of musculoskeletal & neuronal interactions 15 (2).: 227–236.*
5. Schoenfeld BJ (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *Journal of strength and conditioning research 24 (10).: 2857–2872. pmid:20847704*
6. Slysz J, Stultz J, Burr JF (2016). The efficacy of blood flow restricted exercise. *A systematic review & meta-analysis. Journal of science and medicine in sport 19 (8).: 669–675. pmid:26463594*
7. Lixandrão ME, Ugrinowitsch C, Berton R, Vechin FC, Conceição MS et al. (2018). Magnitude of Muscle Strength and Mass Adaptations Between High-Load Resistance Training Versus Low-Load Resistance Training Associated with Blood-Flow Restriction. *A Systematic Review and Meta-Analysis. Sports medicine 48 (2).: 361–378. pmid:29043659*
8. Evans C, Vance S, Brown M (2010). Short-term resistance training with blood flow restriction enhances microvascular filtration capacity of human calf muscles. *Journal of sports sciences 28 (9).: 999–1007. pmid:20544482*
9. Bunevicius K, Grunovas A, Trinkunas E, Poderienė K, Silinskas V et al. (2019). Low- and high-intensity one-week occlusion training improves muscle oxygen consumption and reduces muscle fatigue. *The Journal of sports medicine and physical fitness 59 (6).: 941–946. pmid:29991216*
10. Faul F, Erdfelder E, Buchner A, Lang A-G (2009). Statistical power analyses using G*Power 3. *1. Tests for correlation and regression analyses. Behavior research methods 41 (4).: 1149–1160. pmid:19897823*
11. Man IOW, Markland KL, Morrissey MC (2004). The validity and reliability of the Perometer in evaluating human knee volume. *Clinical physiology and functional imaging 24 (6).: 352–358. pmid:15522044*
12. Franchi MV, Longo S, Mallinson J, Quinlan JI, Taylor T et al. (2018). Muscle thickness correlates to muscle cross-sectional area in the assessment of strength training-induced hypertrophy. *Scandinavian journal of medicine & science in sports 28 (3).: 846–853.*
13. Loenneke JP, Dankel SJ, Bell ZW, Spitz RW, Abe T et al. (2019). Ultrasound and MRI measured changes in muscle mass gives different estimates but similar conclusions. *A Bayesian approach. European journal of clinical nutrition 73 (8).: 1203–1205. pmid:31015562*
14. Legerlotz K, Smith HK, Hing WA (2010). Variation and reliability of ultrasonographic quantification of the architecture of the medial gastrocnemius muscle in young children. *Clinical physiology and functional imaging 30 (3).: 198–205. pmid:20184623*
15. Ruggiero L, Dewhurst S, Bampouras TM (2016). Validity and Reliability of Two Field-Based Leg Stiffness Devices. *Implications for Practical Use. Journal of applied biomechanics 32 (4).: 415–419. pmid:26959196*
16. Gavanda S, Geisler S, Quittmann OJ, Schiffer T (2019). The Effect of Block Versus Daily Undulating Periodization on Strength and Performance in Adolescent Football Players. *International journal of sports physiology and performance 14 (6).: 814–821. pmid:30569761*
17. Lowery RP, Joy JM, Loenneke JP, Souza EO de, Machado M et al. (2014). Practical blood flow restriction training increases muscle hypertrophy during a periodized resistance training programme. *Clinical physiology and functional imaging 34 (4).: 317–321. pmid:24188499*
18. Heller GZ, Manuguerra M, Chow R (2016). How to analyze the Visual Analogue Scale. *Myths, truths and clinical relevance. Scandinavian journal of pain 13: 67–75. pmid:28850536*
19. Dankel SJ, Loenneke JP (2018). Effect Sizes for Paired Data Should Use the Change Score Variability Rather Than the Pre-test Variability. *Journal of strength and conditioning research.*
20. Clark BC, Manini TM, Hoffman RL, Williams PS, Guiler MK et al. (2011). Relative safety of 4 weeks of blood flow-restricted resistance exercise in young, healthy adults. *Scandinavian journal of medicine & science in sports 21 (5).: 653–662.*
21. Ellefsen S, Hammarström D, Strand TA, Zacharoff E, Whist JE et al. (2015). Blood flow-restricted strength training displays high functional and biological efficacy in women. *A within-subject comparison with high-load strength training. American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology 309 (7).: R767–79. pmid:26202071*
22. Karabulut M, Abe T, Sato Y, Bemben MG (2010). The effects of low-intensity resistance training with vascular restriction on leg muscle strength in older men. *European journal of applied physiology 108 (1).: 147–155. pmid:19760431*
23. Libardi CA, Chacon-Mikahil MPT, Cavaglieri CR, Tricoli V, Roschel H et al. (2015). Effect of concurrent training with blood flow restriction in the elderly. *International journal of sports medicine 36 (5).: 395–399. pmid:25700103*
24. Loenneke JP, Wilson JM, Marín PJ, Zourdos MC, Bemben MG (2012). Low intensity blood flow restriction training. *A meta-analysis. European journal of applied physiology 112 (5).: 1849–1859. pmid:21922259*
25. Kelley K, Preacher KJ (2012). On effect size. *Psychological methods 17 (2).: 137–152. pmid:22545595*
26. Kubo K, Komuro T, Ishiguro N, Tsunoda N, Sato Y et al. (2006). Effects of low-load resistance training with vascular occlusion on the mechanical properties of muscle and tendon. *Journal of applied biomechanics 22 (2).: 112–119. pmid:16871002*
27. Laurentino GC, Ugrinowitsch C, Roschel H, Aoki MS, Soares AG et al. (2012). Strength training with blood flow restriction diminishes myostatin gene expression. *Medicine and science in sports and exercise 44 (3).: 406–412. pmid:21900845*
28. Weiss LW, Clark FC, Howard DG (1988). Effects of heavy-resistance triceps surae muscle training on strength and muscularity of men and women. *Physical therapy 68 (2).: 208–213. pmid:3340658*
29. Kubo K, Morimoto M, Komuro T, Yata H, Tsunoda N et al. (2007). Effects of plyometric and weight training on muscle-tendon complex and jump performance. *Medicine and science in sports and exercise 39 (10).: 1801–1810. pmid:17909408*
30. Ste Croix MBA de, Hughes JD, Lloyd RS, Oliver JL, Read PJ (2017). Leg Stiffness in Female Soccer Players. *Intersession Reliability and the Fatiguing Effects of Soccer-Specific Exercise. Journal of strength and conditioning research 31 (11).: 3052–3058. pmid:29065079*
31. Farley CT, Morgenroth DC (1999). Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *Journal of*

biomechanics 32 (3).: 267–273. pmid:10093026
32. Wikstrom EA, Tillman MD, Chmielewski TL, Borsa PA (2006). Measurement and evaluation of dynamic joint stability of the knee and ankle after injury. *Sports medicine 36 (5).: 393–410. pmid:16646628*
33. Mersmann F, Bohm S, Arampatzis A (2017). Imbalances in the Development of Muscle and Tendon as Risk Factor for Tendinopathies in Youth Athletes. *A Review of Current Evidence and Concepts of Prevention. Frontiers in physiology 8: 987. pmid:29249987*
34. Centner C, Lauber B, Seynnes OR, Jerger S, Sohnius T et al. (2019). Low-load blood flow restriction training induces similar morphological and mechanical Achilles tendon adaptations compared with high-load resistance training. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985). 127 (6).: 1660–1667.*
35. Bohm S, Mersmann F, Arampatzis A (2015). Human tendon adaptation in response to mechanical loading. *A systematic review and meta-analysis of exercise intervention studies on healthy adults. Sports medicine—open 1 (1).: 7. pmid:27747846*
36. Wernbom M, Järrebring R, Andreasson MA, Augustsson J (2009). Acute effects of blood flow restriction on muscle activity and endurance during fatiguing dynamic knee extensions at low load. *Journal of strength and conditioning research 23 (8).: 2389–2395. pmid:19826283*
37. Loenneke JP, Kim D, Fahs CA, Thiebaud RS, Abe T et al. (2015). The effects of resistance exercise with and without different degrees of blood-flow restriction on perceptual responses. *Journal of sports sciences 33 (14).: 1472–1479. pmid:25555163*
38. Scott BR, Loenneke JP, Slattery KM, Dascombe BJ (2015). Exercise with blood flow restriction. *An updated evidence-based approach for enhanced muscular development. Sports medicine 45 (3).: 313–325. pmid:25430600*
39. Fahs CA, Loenneke JP, Thiebaud RS, Rossow LM, Kim D et al. (2015). Muscular adaptations to fatiguing exercise with and without blood flow restriction. *Clinical physiology and functional imaging 35 (3).: 167–176. pmid:24612120*
40. Farup J, Paoli F de, Bjerg K, Riis S, Ringgard S et al. (2015). Blood flow restricted and traditional resistance training performed to fatigue produce equal muscle hypertrophy. *Scandinavian journal of medicine & science in sports 25 (6).: 754–763.*
41. Williams TD, Tolusso DV, Fedewa MV, Esco MR (2017). Comparison of Periodized and Non-Periodized Resistance Training on Maximal Strength. *A Meta-Analysis. Sports medicine 47 (10).: 2083–2100. pmid:28497285*
42. Kraemer WJ, Ratamess NA (2005). Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports medicine 35 (4).: 339–361. pmid:15831061*
43. Fink J, Schoenfeld BJ, Nakazato K (2018). The role of hormones in muscle hypertrophy. *The Physician and sportsmedicine 46 (1).: 129–134. pmid:29172848*

Cita Original

Gavanda S, Isenmann E, Schlöder Y, Roth R, Freiwald J, Schiffer T, et al. (2020) Low-intensity blood flow restriction calf muscle training leads to similar functional and structural adaptations than conventional low-load strength training: A randomized controlled trial. PLoS ONE 15(6): e0235377. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235377