PubliCE, (PubliCE) 2020

Article

Cuatro Semanas de Carga Excéntrica Aumentada Utilizando un Nuevo Dispositivo de Press de Piernas Mejoraron la Fuerza de las Piernas en Atletas Bien Entrenados y Ciclistas Profesionales en Pista de Velocidad

Mellissa Harden[1,2], Alex Wolf[3], Martin Evans[4], Kirsty Marie Hicks[1], Kevin Thomas[1] y Glyn Howatson[1,5]

[1]*Department of Sport, Exercise and Rehabilitation, Northumbria University, Newcastle, United Kingdom*
[2]*Directorate of Psychology and Sport, University of Salford, Greater Manchester, United Kingdom*
[3]*English Institute of Sport, Manchester, United Kingdom*
[4]*The Football Association, Burton on Trent, United Kingdom*
[5]*Water Research Group, North West University, Potchefstroom, South Africa*

INTRODUCCIÓN

La fuerza muscular es un factor importante que contribuye al rendimiento deportivo [1]. Una mayor fuerza muscular se asocia con un mejor rendimiento del movimiento [2] y un menor riesgo de lesiones [3] y, como tal, el entrenamiento de la fuerza apropiado para aumentar las cualidades de la fuerza es una piedra angular de los programas de preparación deportiva en una amplia gama de deportes [4]. Los ejercicios de entrenamiento de la fuerza convencionales, como la sentadilla y el peso muerto, son eficaces para mejorar la fuerza muscular, sin embargo, están limitados por la cantidad de masa que el atleta puede levantar en la fase concéntrica. Por el contrario, los seres humanos son capaces de producir mayores magnitudes de fuerza durante los movimientos excéntricos [5], y las estrategias de entrenamiento que permiten una sobrecarga de acciones musculares excéntricas son potencialmente más eficaces que el entrenamiento de fuerza tradicional [6-8], particularmente para los atletas con antecedentes de larga historia de entrenamiento que podrían estar limitados en su potencial para adaptarse a los métodos tradicionales del entrenamiento de la fuerza [9-11]. La novedad potencial que ofrecen las estrategias de entrenamiento excéntrico, junto con el potencial de provocar fuerzas musculares más altas que el entrenamiento tradicional, hace que estos enfoques sean atractivos para poblaciones atléticas bien entrenadas.

La aplicación del entrenamiento excéntrico de alta intensidad es eficaz para mejorar la fuerza, probablemente en mayor

medida que el entrenamiento concéntrico como lo demostraron por primera vez Bradenburg y Docherty [12], sin embargo, pocos estudios han adoptado un enfoque de entrenamiento ecológicamente válido (La validez ecológica es un tipo de validez externa que analiza el entorno de prueba y determina cuánto influye en el comportamiento). Después del uso habitual del ejercicio excéntrico de alta intensidad, hay evidencia de un aumento de la capacidad máxima de producir fuerza durante los esfuerzos excéntricos, concéntricos e isométricos [6,13], y numerosos estudios apoyan la superioridad del entrenamiento excéntrico frente al concéntrico para obtener mejoras en las medidas de fuerza [6,8,13-15]. La mayoría de esos estudios emplearon ejercicio isocinético y/o excéntrico de una sola articulación, mientras que en la práctica los atletas suelen realizar movimientos compuestos de múltiples articulaciones. Dos estudios han demostrado la superioridad de los regímenes de entrenamiento de fuerza excéntrica utilizando una carga excéntrica aumentada (CEA, donde la carga para la fase excéntrica es >100% de la fuerza concéntrica) para aumentar la fuerza en movimientos compuestos con deportistas bien entrenados [16,17]. En comparación con el entrenamiento tradicional, Cook y cols. [16] observaron mayores mejoras en la fuerza de la parte superior e inferior del cuerpo y el rendimiento del salto vertical, y Douglas y cols. [17] informaron mayores aumentos en la fuerza de la parte inferior del cuerpo y la velocidad de sprint, después de un entrenamiento excéntrico. Además, Coratella y Schena [11] demostraron que las mejoras en la fuerza provocadas por la CEA se mantienen después de un período de desentrenamiento, mientras que las del entrenamiento de la fuerza tradicional no. Estos datos indican que el desarrollo de regímenes de entrenamiento ecológicamente válidos que utilizan acciones musculares excéntricas de alta intensidad podría ser más eficaz que el entrenamiento de la fuerza tradicional 'concéntrico limitado' para provocar una adaptación a una variedad de medidas de rendimiento deportivo.

Aunque su aplicación es prometedora, existen importantes desafíos logísticos asociados con la sobrecarga de la fase excéntrica de los movimientos de entrenamiento de la fuerza. Con este fin, hemos desarrollado un nuevo dispositivo de press de piernas capaz de sobrecargar la acción excéntrica de los músculos en un movimiento de la parte inferior del cuerpo, bilateral, de múltiples articulaciones [18,19]. Nuestro trabajo anterior ha establecido la fiabilidad de este estímulo [18], y sus características mecánicas [19], como base sobre la que se prescribe el entrenamiento. Las características del dispositivo también permiten la medición de la fuerza concéntrica y excéntrica máxima y, por lo tanto, el entrenamiento puede prescribirse específicamente en relación con el tipo de acción muscular, en lugar de prescribirse para la fuerza concéntrica [16,17]. Este enfoque es beneficioso, particularmente en atletas altamente entrenados en fuerza, con el fin de garantizar la especificidad de la tarea y tener en cuenta las posibles diferencias individuales en la tolerancia al ejercicio excéntrico. El objetivo de este estudio fue determinar la viabilidad y eficacia del entrenamiento de fuerza con un novedoso dispositivo de press de piernas que proporciona una sobrecarga de la fase excéntrica en la función muscular en individuos bien entrenados en fuerza y en un grupo de ciclistas profesionales en pista de velocidad, al incorporar este enfoque del entrenamiento de la fuerza junto con el entrenamiento específico del deporte. El estudio de un grupo de ciclistas profesionales de tiempo completo en pista de velocidad nos permitió cuantificar la viabilidad y eficacia de un nuevo estímulo de la CEA en un grupo de atletas profesionales altamente entrenados.

MÉTODOS

Diseño

Se empleó un ensayo de control positivo aleatorizado para probar la eficacia del entrenamiento excéntrico del press de piernas. Diecisiete participantes fueron reclutados y asignados a 3 grupos para completar el entrenamiento de fuerza tradicional (TRAD, que actuó como un grupo de control activo) [20] o con carga excéntrica aumentada (CEA y CEA-ATL) realizada en un press inclinado de piernas a medida, dos veces por semana, durante cuatro semanas [18]. Todos los grupos realizaron el ejercicio de press de piernas utilizando un movimiento excéntrico-concéntrico acoplado con un tempo de cinco segundos para la fase excéntrica, y con máxima intento durante toda la fase concéntrica. La diferencia entre los grupos estaba en los parámetros de carga para la fase excéntrica; el grupo TRAD realizó la fase descendente con la misma carga que la fase ascendente, que se prescribió en función de la fuerza concéntrica únicamente; los grupos CEA y CEA-ATL realizaron la fase descendente a una intensidad relativa a su fuerza excéntrica, y la fase ascendente relativa a su fuerza concéntrica, ofreciendo así una sobrecarga del movimiento excéntrico. El grupo CEA-ATL estaba compuesto por ciclistas profesionales de pista de velocidad a tiempo completo (CEA-ATL) del programa de la academia senior Team GB (un nivel por debajo del programa olímpico senior), para permitir una evaluación de la viabilidad del estímulo de entrenamiento en una población profesional cercana a la élite. El entrenamiento fue precedido por dos sesiones de evaluación separadas para medir los perfiles de fuerza individuales en sentadilla con barra atrás (día 1) y en el ejercicio de press de piernas (día 2). La primera sesión previa a la prueba incluyó familiarización con la máquina de prenss de piernas y el tempo requerido para la fase excéntrica. Los participantes ya estaban acostumbrados al press de piernas tradicional y al ejercicio de sentadillas gracias a su propio entrenamiento. Las dos sesiones previas a la prueba estuvieron separadas por 3 días. Las dos sesiones de evaluación se repitieron después del entrenamiento separadas por 3 días, después de una descarga de 7

días. Durante el período de prueba posterior a la sesión, el grupo CEA-ATL estuvo sujeto a un aumento agudo y no planificado en su carga de entrenamiento antes de su segundo día de evaluación, lo que significó que una prueba de fuerza no se pudo completar debido a la fatiga residual (evaluación de 1 máxima repetición tradicional del press de piernas, descrita a continuación).

Participantes

Diecisiete participantes, doce hombres y cinco mujeres, dieron su consentimiento informado por escrito para participar en el estudio, que fue aprobado por el Comité de Ética de la Facultad de Salud y Ciencias de la Vida de la Universidad de Northumbria. Las características de los participantes se presentan en la Tabla 1. Doce participantes tenían antecedentes en deportes de fuerza-potencia (levantamiento de pesas, rugby, atletismo, gimnasia y combate), con 3 a 10 años de experiencia en entrenamiento de fuerza pesado; se emparejaron para la fuerza máxima en 3 repeticiones de sentadilla en relación con la masa corporal (3MR), y se asignaron al azar en dos grupos (CEA (n = 6; 1 mujer y 5 hombres) y TRAD (n = 6; 2 mujeres y 4 hombres). Los participantes en el grupo TRAD y CEA estaban entrenados en fuerza, pero no eran atletas profesionales a tiempo completo. Los participantes en el grupo CEA-ATL eran atletas profesionales de ciclismo de velocidad en pista a tiempo completo (n = 5; 2 mujeres y 3 hombres). Durante el desarrollo del estudio, se pidió a los grupos CEA y TRAD que evitaran cualquier actividad de entrenamiento de la fuerza de la parte inferior del cuerpo fuera del programa de ejercicios prescritos y que evitaran el ejercicio cardiovascular y de fuerza no acostumbrados durante el tiempo del estudio. Los participantes de los grupos CEA y TRAD continuaron practicando su deporte dos o tres veces por semana a una intensidad moderada y confirmaron que no estaban preparados para competir o rendir a una intensidad alta o máxima durante el período de estudio. El grupo CEA-ATL continuó con su programa de entrenamiento a tiempo completo de ciclismo de velocidad en pista.

Tabla 1. *Características de los participantes al inicio del estudio para cada grupo de entrenamiento.*
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236663.t001

Group	*n*	Age (Yrs)			Stature (cm)			Mass (kg)		
AEL-ATH	5	19	±	0	174	±	13	76	±	12
AEL	6	28	±	2	179	±	7	82	±	9
TRAD	6	26	±	5	177	±	7	77	±	9

Values are mean ± SD.

PROCEDIMIENTOS

Perfil de fuerza.

La fuerza se midió en el ejercicio de press de piernas (isométrico, concéntrico, excéntrico) y con una sentadilla tradicional con tres repeticiones como máximo. El press de piernas adaptado se ha descrito anteriormente [18,19]. En resumen, la máquina ofrece una sobrecarga de la función excéntrica a través de la tecnología neumática, que se puede "descargar" inmediatamente para la fase concéntrica del movimiento mediante interruptores de láminas ajustables operados magnéticamente. La fuerza se midió a través de 4 celdas de carga tipo s (límite de 300 kg por celda) montadas sobre placas de pies, que se alimentaban a un combinador para crear una salida de voltaje único. Asociado con cada celda de carga, había un potenciómetro (Hybritron®, 3541H1-102-L, Bourns, México). Las celdas de carga y los potenciómetros se muestrearon a 200 Hz. El voltaje de las celdas de carga y los potenciómetros se transmitieron al software de adquisición de datos (LabVIEW 6.1 con NI-DAQ 6.9.2, *National Instruments Corporation*, EE. UU.) en una PC de escritorio. Se mostraron curvas de fuerza-tiempo para cada placa de fuerza (izquierda y derecha) y curvas de desplazamiento y tiempo de velocidad para cada potenciómetro (izquierda y derecha). Los datos brutos se exportaron desde el software de adquisición de datos al formato de Microsoft Excel (Microsoft Excel, 2010) y se analizaron fuera de línea.

Evaluación de la fuerza isométrica (ISO90). Para determinar la producción de la fuerza isométrica máxima, se aseguró el carro del press de piernas a un ángulo requerido de la articulación de la rodilla (90°, verificado por goniometría). Se eligió el ángulo de articulación de 90° ya que se usa comúnmente para la evaluación isométrica [21,22]. Además, el ángulo de 90° refleja el ángulo en el rango final del movimiento (ROM) común al ejercicio excéntrico-concéntrico acoplado. Se usaron correas de trinquete (límite >600 kg) para fijar el carro firmemente en su lugar para evitar movimientos no deseados y

mantener la integridad del ángulo de la articulación de la rodilla y la cadera. Se realizaron dos esfuerzos preparatorios al 50% y al 75% del esfuerzo percibido, separados por 30 segundos. La prueba consistió en tres esfuerzos máximos de 5 seg intercalados por tres minutos. Durante cada esfuerzo, se les indicó a los participantes que "acumularan fuerza progresivamente para empujar lo más fuerte posible hasta que se les indicara que se detuvieran". Se proporcionó el mismo fuerte estímulo verbal para todos los esfuerzos. Las medidas de fuerza unilaterales se sumaron para reflejar la naturaleza bilateral del ejercicio. Para el análisis se utilizó la prueba con el pico de fuerza más alto. La reproductibilidad se ha establecido previamente [18]; coeficiente de correlación intraclase (CCI): 0,92; coeficiente de variación (CV: 3,4%); cambio más pequeño que valga la pena (SWC): 3,3%.

Evaluación de la máxima de repetición tradicional (TRAD1MR). Esta evaluación determinó el peso máximo que se podía mover a través de una fase inicial de descenso (excéntrico) y luego de levantamiento (concéntrica) hasta los 5 kg más cercanos para una sola repetición. Esto se estableció en cinco intentos, separados por cinco minutos. El rango de movimiento (ROM) se estandarizó a 90° de la flexión de rodilla. Si no se lograba el ROM completo, el esfuerzo se consideraba una repetición fallida. La carga máxima levantada se registraba para su análisis. La reproductibilidad de la medición se ha establecido previamente; ICC: 0,98; CV: 2,2%; SWC: 3,25%.

Evaluación de la fuerza concéntrica máxima (CON1MR). Esta evaluación estableció la fuerza máxima que podría producirse durante un movimiento sólo concéntrico. Los participantes realizaron esfuerzos desde un empujón "muerto" en un ángulo de la articulación de la rodilla de 90° con 5 minutos de separación entre los intentos máximos. La carga se ajustó en incrementos de 5 kg y todos los participantes alcanzaron su máximo en 5 intentos. Las intensidades de entrenamiento para la fase concéntrica se basaron en el valor de CON1MR. La fuerza máxima registrada durante el levantamiento de la carga más pesada de los participantes se registró para su análisis.

Evaluación de la fuerza excéntrica máxima (EXC1MR). Esta evaluación determinó la fuerza máxima que podría imponerse al participante y que podría controlarse a lo largo del ROM de la fase descendente del ejercicio de press de piernas durante una duración de cinco segundos. La fase concéntrica se cargó con el 50% de TRAD1MR. Para estandarizar el ritmo de la fase excéntrica, una tira de LED personalizada con LED direccionables individualmente (WS2812, BTF Lighting Technology Co. Ltd) controlada por una placa de desarrollo (Elegoo Mega 2560 R3, Elegoo Inc. Reino Unido y Arduino 1.8.4) y se agregó un código escrito personalizado al instrumento. Los LEDs se iluminaban de manera gradual para crear un rastro de luz que el participante seguía, utilizando un marcador asegurado al carro. La longitud del rastro de luz (número total de luces LED) se preestableció a una distancia que reflejaba el desplazamiento del carro de pie en un ángulo de rodilla de 90°. El primer esfuerzo excéntrico se realizó con una carga equivalente a TRAD1MR. La carga se incrementó en un 5% hasta que el ritmo de cinco segundos establecido por las luces LED ya no se podía mantener. Se prescribió un descanso de cinco minutos entre los intentos. Después de un esfuerzo fallido, a los sujetos se les dio un nuevo intento de carga. En el caso de un segundo intento fallido, se utilizó para el análisis la producción de fuerza asociada con el esfuerzo anterior. Se registró la fuerza máxima para el análisis, que se logró en seis esfuerzos para todos los participantes. La reproductibilidad de la medición se ha establecido previamente [18]; ICC: 0,93; CV: 3,0%; SWC: 2,9%.

Tres repeticiones máximas de Sentadilla (SQ3MR). Se registró la carga máxima que los participantes podían completar en 3 repeticiones de sentadilla con barra alta y se usó para prescribir el entrenamiento posterior. Los procedimientos para alcanzar SQ3MR siguieron un protocolo previamente establecido, produciendo resultados reproductibles (CV = 2,1%) para individuos entrenados en fuerza [23]. Los participantes la sentadilla con flexión completa de las rodillas, o cuando esto no era posible, hasta una profundidad en la que el fémur estaba al menos paralelo al suelo. Se colocaron pines en el rack de sentadillas correspondientes a la altura de la barra alcanzada en la parte inferior de la sentadilla para asegurar que se lograra una profundidad constante; Esto fue confirmado visualmente por el investigador principal para cada repetición. Los participantes bajaron la carga bajo control (aproximadamente 3 seg fase excéntrica) y se les indicó que invirtieran inmediatamente el movimiento y realizaran la fase concéntrica lo más rápido posible. Los participantes completaron repeticiones de calentamiento submáximas hasta una carga equivalente al 85% de 1MR predecida. Posteriormente se estableció el valor de SQ3MR en un máximo de cinco intentos, con cinco minutos de descanso permitido entre los esfuerzos.

Intervención del entrenamiento.

En la Tabla 2 se muestra una descripción general de la intervención del entrenamiento. La intervención duró siete semanas en total. La semana uno y la semana siete se asignaron a la evaluación inicial y posterior, respectivamente. La semana dos hasta la semana cinco comprendió el período de entrenamiento. La semana seis se asignó a un período de descarga. Durante el período de entrenamiento principal, la sobrecarga progresiva se logró mediante un aumento gradual en la intensidad (% 1MR determinado en relación con EXC1MR o CON1MR, como se describe a continuación) cada semana, comenzando con un rango entre 82.5-87.5% 1MR en la semana uno a 97.5– 102.5% 1MR en la semana 4. Para ilustrar esta progresión, en la semana 1 para los ejercicios de press de piernas y sentadilla, los participantes realizaron series de 3 repeticiones al 82.5%, 85% y 87.5% de 1MR. En la última semana de entrenamiento, los participantes realizaron las

mismas series y ejercicios con cargas del 97,5%, 100% y 102,5% de 1MR. La Tabla 2 proporciona detalles completos de la intervención del ejercicio y las variables de la programación.

Tabla 2. *Resumen de la intervención del entrenamiento.*

		Training overview						
Week number		1	2	3	4	5	6	7
Objectives		Familiarisation Strength assessment	Training 1	Training 2	Training 3	Training 4	Deload	Strength assessment
Intensity classification		Very heavy	Moderate	Moderate-Heavy	Heavy	Very Heavy	Moderate	Very Heavy
Sessions per week		2	2	2	2	2	2	2
		Exercise prescription (Sets × Reps %1RM)						
		*Leg press load was set relative to ECC_{1RM} for AEL and AEL-ATH, and relative to CON_{1RM} for TRAD						
1	**Leg press***	Max	4×3 82.5–87.5%	4×3 87.5–92.5%	4×3 92.5–97.5%	4×3 97.5–102.5%	3×3 82.5%	Max
2	**Back squat**	Max	3×3 82.5–87.5%	3×3 87.5–92.5%	3×3 92.5–97.5%	3×3 97.5–102.5%	3×3 82.5–87.5%	Max
3	**Pull from floor**	N/A	3×6 70–75%	3×6 70–75%	3×6 70–75%	3×6 70–75%	3×3 70%	N/A
	Conditioning circuit:	N/A	3 rounds:	3 rounds:	3 rounds:	3 rounds:	N/A	N/A
4a	SL goblet squat		×8 reps	×8 reps	×8 reps	×8 reps		
4b	Isometric trunk hold		×30 s	×30 s	×30 s	×30 s		
4c	Lying leg raise		×10 reps	×10 reps	×10 reps	×10 reps		

Los grupos CEA y CEA-ATL realizaron ejercicio de press de piernas con una fase excéntrica aumentada (EXC) (la intensidad EXC se estableció en relación con la fuerza EXC máxima). El grupo TRAD realizó el ejercicio de press de piernas de una manera tradicional donde las fases concéntrica (CON) y EXC se prescribieron para la fuerza máxima de repetición CON.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236663.t002

Los participantes realizaron el mismo programa de acondicionamiento, la única diferencia fue en la prescripción de carga para el ejercicio de press de piernas. Los grupos CEA y CEA-ATL realizaron un ejercicio de press de piernas excéntrico-concéntrico acoplado con carga para la fase excéntrica y concéntrica prescritas en relación con los valores de EXC1MR y de CON1MR, respectivamente, ofreciendo así una sobrecarga precisa de la fase excéntrica. El grupo TRAD realizó un ejercicio de press de piernas excéntrico-concéntrico acoplado con la misma carga durante ambas fases, que se prescribió en relación con el valor de CON1MR. El grupo CEA-ATL también continuó su entrenamiento de ciclismo de velocidad en pista de carrera.

Análisis estadístico

Los valores se expresan como media ±SD. Se comprobó la normalidad de todos los conjuntos de datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$). Las características del programa se examinaron utilizando un ANOVA de una vía para determinar las diferencias en la intensidad del entrenamiento entre los grupos TRAD, CEA y CEA-ATL. Para evaluar el efecto del entrenamiento, se realizaron ANOVA mixtos de 2 × 3 con un factor de tiempo dentro de los sujetos (antes del entrenamiento versus después del entrenamiento) y un factor de grupo entre sujetos (TRAD vs CEA vs CEA-ATL) para evaluar los cambios en los diagnósticos de fuerza. Los principales modelos ANOVA incluyeron tamaños de efecto $\eta p2$, y los efectos principales significativos fueron seguidos por pruebas *post-hoc* de Diferencia Mínima Significativa. Los cambios relativos desde antes y después del entrenamiento se presentan utilizando diagramas de '*forest*' que se muestran como X± 95% CI, con una ilustración del error de medición de la prueba. Las g de Hedges se utilizaron para cuantificar los tamaños del efecto, interpretados como pequeños (>0,2), medianos (>0,5) y grandes (>0,8) [24]. La significación estadística se aceptó en $p < 0,05$.

RESULTADOS

Características de los programas

La intensidad relativa del entrenamiento realizado durante la fase concéntrica no fue diferente entre los tres grupos ($F(2,21) = 2.3$, $p = 0.12$, $\eta p2 = 0.18$). La intensidad relativa del entrenamiento realizada durante la fase excéntrica fue diferente entre los grupos ($F(2,21) = 24.5$, $p < 0.01$, $\eta p2 = 0.70$), por lo que TRAD entrenó con menor intensidad relativa en comparación con CEA (−8.42 Nkg-1, −11,74 a −5,09 N·kg-1) y con CEA-ATL (−6,80 N·kg-1, −10,12 a −3,48 N·kg-1). Los grupos CEA-ATL y CEA realizaron la fase excéntrica con un 26±4% más de intensidad a lo largo de la intervención de entrenamiento en comparación con TRAD.

Diagnóstico de la fuerza

Todos los grupos de entrenamiento experimentaron aumentos en la fuerza después del entrenamiento. El máximo de repetición excéntrica aumentó para todos los grupos (Tabla 3, Fig 1), sin diferencia entre los grupos en la magnitud del cambio (grupo × tiempo $p = 0.25$, Tabla 3), lo que equivale a tamaños de efecto de 0.7, 0.4 y 0.3 para CEA, TRAD y CEA-ATL, respectivamente. Tanto los grupos TRAD como CEA mejoraron el valor de ISO90 (CEA, $p < 0.01$, $g = 0.7$; TRAD, $p = 0.04$, $g = 0.4$) y de CON1MR (CEA, $p < 0.01$, $g = 0.5$; TRAD $p = 0.02$, $g = 0.3$) post-entrenamiento de la fuerza. El cambio en ISO90 (1.8 N·kg-1, −0.1 a 3.7 N·kg-1, $p = 0.06$, $g = 0.4$) y en CON1MR (1.1 N·kg-1, −0.2 a 2.4 N·kg-1, $p = 0.10$, $g = 0.2$) para el grupo CEA-ATL no alcanzó significación estadística.

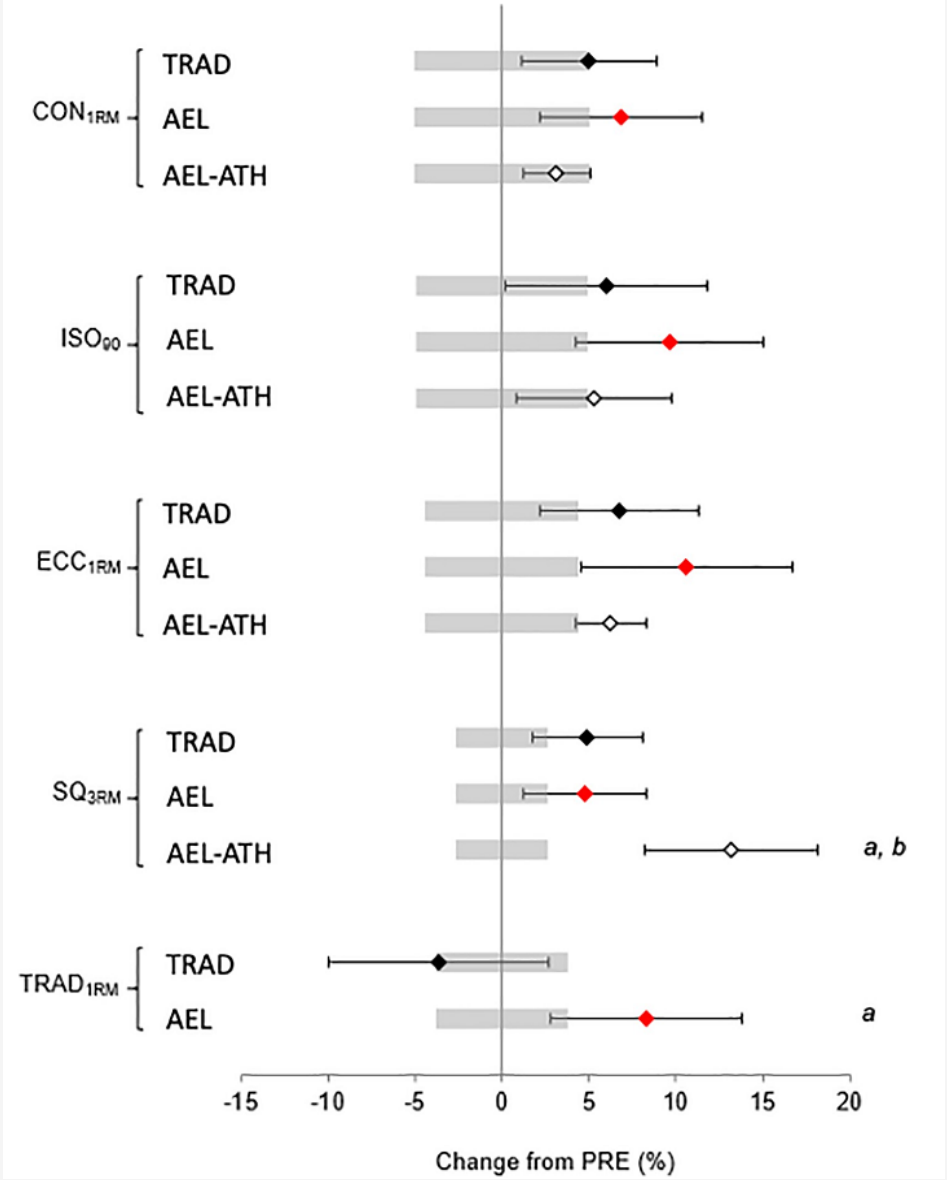


Figura 1. *Cambios relativos (intervalos de confianza de ±95%) en la fuerza después del entrenamiento con (CEA, CEA-ATL) y sin (TRAD) carga excéntrica aumentada.*
Las barras sombreadas representan el error de medición para cada medida resultante. a, diferente de TRAD, b, diferente de CEA ($p < 0.05$).

https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236663.g001

Tabla 3. *Estadísticas del modelo ANOVA y cambios en el diagnóstico de la fuerza después del entrenamiento con (CEA, CEA-ATL) y sin (TRAD) carga excéntrica aumentada.*

								ANOVA								
		PRE			POST			Group			Time			Group x Time		
Variable	Group	$\bar{x}$	±	SD	$\bar{x}$	±	SD	*F*	*p*	η_p^2	*F*	*p*	η_p^2	*F*	*p*	η_p^2
CON_{1RM} ($N \cdot kg^{-1}$)	TRAD	32.2	±	4.4	33.7	±	3.75*	1.49	0.26	0.18	22.60	< 0.01	0.62	0.91	0.43	0.12
	AEL	34.1	±	4.5	36.3	±	3.57*									
	AEL-ATH	36.8	±	5.0	37.9	±	4.60*									
ISO_{90} ($N \cdot kg^{-1}$)	TRAD	33.3	±	4.9	35.1	±	3.91*	0.88	0.44	0.11	22.45	< 0.01	0.62	0.91	0.43	0.12
	AEL	34.5	±	4.6	37.6	±	3.37*									
	AEL-ATH	36.8	±	5.2	38.6	±	4.74									
ECC_{1RM} ($N \cdot kg^{-1}$)	TRAD	35.7	±	5.5	38.0	±	5.13*	2.15	0.15	0.24	38.93	< 0.01	0.74	1.56	0.25	0.18
	AEL	40.4	±	5.2	44.6	±	5.40*									
	AEL-ATH	42.2	±	7.1	44.8	±	7.36*									
$TRAD_{1RM}$ ($N \cdot kg^{-1}$)	TRAD	34.6	±	5.3	33.4	±	5.50	2.42	0.15	0.20	1.05	0.33	0.10	7.36	0.02	0.42
	AEL	36.5	±	3.6	39.4	±	3.53*									
	AEL-ATH															
SQ_{3RM} ($kg \cdot BW^{-1}$)	TRAD	1.59	±	0.27	1.66	±	0.25*	0.54	0.60	0.07	61.23	< 0.01	0.81	7.47	0.01	0.52
	AEL	1.70	±	0.19	1.78	±	0.14*									
	AEL-ATH	1.62	±	0.18	1.83	±	0.15*									

CON_{1RM}, leg press concentric maximum force; ISO_{90}, leg press isometric maximum force at 90˚ knee angle; ECC_{1RM}, leg press eccentric maximum force; $TRAD_{1RM}$, coupled eccentric-concentric leg press maximum force; SQ_{3RM}, three repetition maximum back squat relative to body mass.

*Los cambios significativos antes y después del entrenamiento dentro del grupo se indican con * (p <0,05).*

https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236663.t003

Para SQ3MR y el press de piernas TRAD1MR hubo interacciones significativas de grupo × tiempo. Específicamente, el grupo CEA-ATL aumentó en SQ3MR en mayor medida (g = 1,1) que CEA (p <0,01, g = 0,4) y que TRAD (p = 0,01, g = 0,3) (Tabla 3, Fig 1). Para el press de piernas TRAD1MR no hubo un efecto principal para el tiempo (p = 0.33), sin embargo, el aumento en el grupo CEA (2.93 N·kg-1, 0.46 a 5.40 N·kg-1, g = 0.8) fue diferente a la leve disminución en el grupo TRAD (−1,32 N·kg-1, −3,80 a 1,15 N·kg-1, g = −0,2, grupo × tiempo p = 0,02). El grupo CEA-ATL no realizó la prueba posterior de TRAD1MR de press de piernas debido a la fatiga residual inesperada antes mencionada.

Discusión

El objetivo de este trabajo fue determinar la viabilidad y eficacia del entrenamiento con un novedoso dispositivo de press de piernas, que permite una sobrecarga de acciones de alargamiento muscular, en atletas de fuerza bien entrenados y ciclistas profesionales en pista de velocidad. Cuatro semanas de entrenamiento de fuerza excéntrica provocaron mejoras en una variedad de diagnósticos de fuerza, con alguna evidencia de mayores magnitudes de mejora en comparación con el entrenamiento de la fuerza tradicional. En un grupo de ciclistas profesionales, se implementó con éxito un estímulo de entrenamiento excéntrico de cuatro semanas y fue eficaz para mejorar las medidas de fuerza muscular, incluido un aumento relativamente mayor en la fuerza de 1MR en sentadillas. Por lo tanto, un programa de entrenamiento de fuerza excéntrica a corto plazo (4 semanas, 8 sesiones) fue eficaz y bien tolerado por atletas de fuerza bien entrenados y ciclistas de pista de velocidad, y ofrece un nuevo ejercicio de entrenamiento para mejorar los índices de la fuerza muscular.

El programa de entrenamiento de cuatro semanas empleado fue suficiente para provocar mejoras en una variedad de características de la fuerza, con algunas diferencias específicas entre los grupos en los cambios de fuerza inducidos por el entrenamiento. Todos los grupos mejoraron la fuerza de press de piernas concéntrica, excéntrica e isométrica, y las magnitudes de la mejora fueron comparables a las reportadas anteriormente para individuos entrenados en fuerza para entrenamientos a corto plazo (4 a 6 semanas) [11,17,25], pero menos que lo observado para el entrenamiento de más largo plazo (10-12 semanas), que incorpora carga excéntrica aumentada [16,26]. El grupo CEA mejoró el máximo de 1 repetición de press de piernas en mayor medida que el grupo TRAD, y el grupo CEA-ATL mejoró su máximo de 3 repeticiones de sentadilla más que los grupos TRAD y CEA. Con respecto al grupo CEA, el mayor incremento en 1MR del press de piernas

en comparación con TRAD sugiere una posible mayor eficacia del entrenamiento con carga excéntrica aumentada. Esto está parcialmente respaldado por un cambio relativamente mayor en la fuerza concéntrica (7% vs 5%), excéntrica (11% vs 7%) e isométrica (10% vs 6%) en CEA en comparación con TRAD; sin embargo, estas interpretaciones deberían ser tratadas con precaución ya que ninguna de estas comparaciones alcanzó significación estadística. El programa de entrenamiento empleado fue relativamente corto (4 semanas, 8 sesiones) y es plausible especular que una duración más larga podría haber revelado más diferencias entre los grupos. Esta noción está respaldada por los hallazgos presentados por Walker y cols. [26] que destacan que los beneficios de la carga excéntrica aumentada para individuos entrenados en fuerza pueden tardar algún tiempo en manifestarse (más de cinco semanas). Por lo tanto, las investigaciones futuras que se basen en estos datos preliminares deberían considerar implementar un período de entrenamiento más largo.

El grupo CEA-ATL incorporó el estímulo de sobrecarga excéntrica junto con su programa habitual de acondicionamiento físico y el entrenamiento de ciclismo en pista. En este grupo hubo grandes cambios en la fuerza repeticiones máximas de sentadillas que excedieron la magnitud del cambio observado en TRAD y CEA, y fue mayor que el reportado previamente en cohortes atléticas [16,17]. Sin embargo, esto contrastó con los cambios relativamente modestos en la fuerza concéntrica, excéntrica e isométrica. Esto puede explicarse en parte por una interrupción inesperada del programa de entrenamiento de los atletas durante el período posterior a la prueba. La prueba de la repetición máxima de sentadillas se realizó en el día 1 de 2 después de la prueba, después de un período de descarga adecuado. Sin embargo, en el segundo día de pruebas, que incluía diagnósticos de fuerza en el press de piernas, el grupo CEA-ATL experimentaba una fatiga residual como consecuencia de una carga de entrenamiento aguda inesperadamente alta y la evaluación de la fuerza anterior. Esto también requirió la terminación de los procedimientos de prueba antes de hacer el test de 1MR del press de piernas tradicional. Los requisitos para la organización de las pruebas posteriores y el tiempo asignado para la recuperación debían adaptarse para que el grupo CEA-ATL tuviera en cuenta las limitaciones logísticas que rodean la participación deportiva profesional a tiempo completo. Estos factores estaban más allá del control del experimentador y, como tal, el verdadero impacto del programa de entrenamiento podría no haber sido revelado como consecuencia, aunque vale la pena señalar que los puntajes de fuerza tanto concéntricos como excéntricos eran más altos, a pesar de que esta fatiga residual comprometía el programa de pruebas. No obstante, el presente estudio demuestra que los ejercicios de entrenamiento de fuerza que sobrecargan las acciones musculares excéntricas pueden incorporarse de manera factible en el programa de entrenamiento de los atletas profesionales de pista de velocidad a tiempo completo, y podrían potencialmente provocar mayores mejoras en la fuerza en comparación con el entrenamiento tradicional.

Una característica relativamente novedosa del estudio fue la utilización de un enfoque de carga progresiva basado en 1MR específica de la acción muscular para la fase excéntrica y concéntrica a lo largo del período de entrenamiento. La intensidad de entrenamiento experimentada por los grupos CEA y CEA-ATL fue un 23-30% mayor durante el ejercicio de press de piernas, debido a la sobrecarga progresiva de la fase excéntrica del ejercicio. Los estudios anteriores habían programado típicamente la carga para la fase excéntrica en relación con la fuerza concéntrica [16,17,25,26], mientras que el enfoque adoptado aquí permitió la explotación de la mayor capacidad de producción de fuerza asociada con las acciones excéntricas musculares [5,6,8], teniendo en cuenta las diferencias individuales en la fuerza excéntrica. Se desconoce la prescripción óptima de la carga excéntrica aumentada, pero este rango podría proporcionar una guía adecuada para aquellos médicos que no tienen acceso a equipos que faciliten la evaluación segura de la fuerza excéntrica específica. Una limitación de este enfoque es la incapacidad de igualar el volumen entre los grupos. El volumen de ejercicio es un factor clave en la prescripción del entrenamiento de la fuerza y, dada la naturaleza de la prescripción del ejercicio en relación con su fuerza excéntrica máxima, el grupo CEA habría experimentado un volumen mayor en comparación con el grupo TRAD. Coratella y cols. [27] destacaron recientemente la importancia de igualar el volumen en los estudios de entrenamiento de la fuerza. Aunque esto no se logró en el presente estudio, se puede decir que el enfoque adoptado aquí es más válido ecológicamente, ya que normalmente los profesionales que usan la CEA apuntarían a explotar la mayor capacidad de producción de fuerza de las acciones musculares excéntricas. La investigación adicional para descubrir los mecanismos que sustentan la adaptación a diferentes formas de entrenamiento se beneficiaría de un enfoque más controlado [27].

Los resultados de este estudio respaldan la eficacia del entrenamiento con carga excéntrica aumentada para mejorar las cualidades de fuerza de las piernas en atletas bien entrenados. Otra aplicación práctica importante es la positividad del estímulo de entrenamiento en una población atlética profesional a tiempo completo. El grupo CEA-ATL incorporó con éxito el estímulo de entrenamiento excéntrico junto con su programa habitual de entrenamiento específico para el deporte, sin que se informaran resultados adversos. Como anécdota, varios ciclistas también informaron verbalmente una mayor sensación de estabilidad al regresar a sus levantamientos compuestos habituales, lo que se reflejó en las grandes mejoras demostradas en la fuerza de las sentadillas. Una limitación del trabajo actual es que los tamaños de muestra relativamente pequeños y la corta duración del estudio han obstaculizado cualquier conclusión sobre la superioridad relativa de la carga excéntrica aumentada, y las limitaciones logísticas impuestas por las pruebas en una población profesional que hicieron inviable una evaluación más específica del deporte. Además, la similitud de la modalidad de prueba (fuerza de press de piernas en los modos isométrico, concéntrico, excéntrico y tradicional) con el estímulo de entrenamiento, y la especificidad conocida de adaptación a la carga excéntrica [28] también limita la generalización de los resultados a otros movimientos.

Se necesita más investigación para determinar si la fuerza mejorada ofrecida por la CEA usando el ejercicio de press de piernas conduce a mejoras en otros movimientos específicos del deporte. Sin embargo, los resultados demuestran que el entrenamiento con carga excéntrica aumentada es eficaz para mejorar la fuerza de las piernas en atletas bien entrenados, y puede incorporarse de manera factible a un programa de atletas profesionales de tiempo completo sin consecuencias adversas.

El enfoque de la prescripción de ejercicio en este estudio fue de alta validez ecológica; se prescribieron cargas en un intento de optimizar el estrés del estímulo de la CEA a expensas de igualar el volumen de carga, y el ejercicio de press de piernas se incorporó a un programa de entrenamiento de la fuerza más amplio y, por lo tanto, se ejecutó junto con otros ejercicios. Si bien este enfoque refleja lo que ocurriría en la práctica, limita la capacidad de atribuir la causalidad dado que el estímulo del press de piernas no fue el único ejercicio de fuerza que realizaban los grupos. En un intento por aislar el efecto del estímulo del press de piernas, el entrenamiento adicional realizado por todos los grupos se comparó por volumen, intensidad y tipo de acción muscular. Como consecuencia, la única diferencia entre los grupos estuvo en la prescripción del ejercicio de press de piernas; esto aumenta nuestra confianza en que las diferencias observadas entre los grupos podrían deberse a la diferente prescripción de ejercicio, sin embargo, no nos permite aislar el efecto del ejercicio del press de piernas *per se*.

Una limitación potencial final del estudio es que el grupo CEA-ATL era más joven que los grupos CEA y TRAD. El grupo CEA-ATL estaba formado por ciclistas de pista profesionales de tiempo completo que, aunque eran jóvenes en edad cronológica, tenían experiencia con el entrenamiento de la fuerza (>2 años) y mostraban niveles de fuerza en las piernas que no eran diferentes de los otros grupos. Como anécdota, los atletas de este grupo estaban llegando a una meseta en su respuesta al entrenamiento de la fuerza y la carga requerida para lograr la sobrecarga en los movimientos compuestos tradicionales se estaba volviendo tan alta que afectaba negativamente su entrenamiento deportivo específico. Sin embargo, dada la edad más joven de este grupo, no es posible descartar la posibilidad de que tuvieran una capacidad de adaptación relativamente mayor y, por lo tanto, un mayor aumento en la fuerza de las sentadillas observado en el grupo CEA-ATL podría atribuirse en parte a su menor edad de entrenamiento.

En conclusión, cuatro semanas de entrenamiento de la fuerza que incorporó carga excéntrica aumentada, impuesta a través de un novedoso dispositivo de press de piernas, provocó una marcada adaptación en una variedad de cualidades de la fuerza muscular, con evidencia de una mayor magnitud de mejoras en comparación con el entrenamiento de la fuerza tradicional. El estímulo de entrenamiento excéntrico impuso una mayor demanda en comparación con el entrenamiento de la fuerza tradicional, pero esto fue bien tolerado por todos los participantes, incluido un grupo de ciclistas de pista de velocidad. Esto indica que el entrenamiento con carga excéntrica aumentada es factible y eficaz para los atletas que buscan mejorar las cualidades de la fuerza muscular. Se justifica una investigación futura que estudie el entrenamiento durante períodos de tiempo más largos para comprender completamente las consecuencias y adaptaciones a largo plazo de este tipo de entrenamiento.

Información de apoyo

S1 Data.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236663.s001

Agradecimientos

El estudio se realizó como parte de una beca de colaboración entre la Universidad de Northumbria y el Instituto Inglés de Deporte. Los autores desean agradecer a los entrenadores, atletas y personal de apoyo por hacer posible el estudio.

REFERENCIAS

1. Para ver las referencias bibliográficas remitirse al artículo original: (https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236663).

Cita Original

Harden M, Wolf A, Evans M, Hicks KM, Thomas K, Howatson G (2020) Four weeks of augmented eccentric loading using a novel leg press device improved leg strength in well-trained athletes and professional sprint track cyclists. PLoS ONE 15(7): e0236663. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236663