

Article

Fatiga Muscular en Respuesta a Modalidades Diferentes de Sesiones de Crossfit

José Luis Maté-Muñoz, Juan H. Lougedo, Manuel Barba, Pablo García-Fernández, Manuel V. Garnacho-Castaño y Raúl Domínguez

Editor: Pedro Tauler, Universitat de les Illes Balears, ESPAÑA.

Recibido: Noviembre 27, 2016; **Aceptado:** Julio 7, 2017; **Publicado:** Julio 28, 2017

Copyright: © 2017 Maté-Muñoz et al.

RESUMEN

Fundamento

El CrossFit es un régimen de acondicionando de la fuerza que involucra entrenamientos periódicos cortos e intensos llamados entrenamientos del día (WOD). Este estudio evalúa niveles de fatiga muscular inducidos por tres modalidades WOD del CrossFit; gimnasia (G), acondicionamiento metabólico (M) y levantamiento de pesas (W).

Material y métodos

34 sujetos sanos emprendieron tres WOD (uno por semana): un WOD G que consiste en completar el número más alto de series de 5 'pull-ups', 10 'push-ups' y 15 sentadillas sin carga en 20 min; un WOD M en que el número máximo de saltos dobles a la soga ejecutándose en 8 series (20 segundos), con descanso (10 segundos) entre las series; y finalmente, un WOD W en el que el número máximo de 'cleans' de potencia se ejecutó en 5 min, levantando una carga equivalente al 40% de 1RM del individuo. Antes y después de cada WOD, las concentraciones de lactato sanguíneo fueron medidas. También, antes de, durante, y después de cada WOD, la fatiga muscular se evaluó en un test de salto con contramovimiento (CMJ).

Resultados

Se produjeron reducciones significativas en la altura de salto, variables mecánicas, potencia promedio y velocidad máxima en respuesta al WOD G; y en la altura del salto, potencia promedio y pico, velocidad máxima y fuerza máxima en respuesta al WOD W ($P < 0.01$). Sin embargo, en el WOD M, las reducciones significativas en las variables mecánicas se observaron entre pre-sesión y sesión media (después de las series 2, 4, 6 y 8), pero no entre pre- y post-sesión.

Conclusiones

La fatiga muscular, reflejada por las variables de CMJ reducidas, fue producida luego de las sesiones G y W, mientras la recuperación de esta fatiga se observó al final de la sesión M, probablemente atribuible a los intervalos de descanso que permiten una recuperación de las reservas de la fosfocreatina. Nuestros resultados también indican que alta intensidad y volumen de ejercicio en los WODs G y W pudieron llevar a una reducida rigidez músculo-tendón causando una pérdida de la capacidad de salto, relacionada aquí a una fase isométrica más larga durante el CMJ.

INTRODUCCIÓN

El CrossFit es un nuevo régimen del fitness que consiste en entrenamientos cortos diarios de alta intensidad [1]. Puesto que su desarrollo en los '90s, se ha vuelto un deporte de competición con cerca de 11.000 afiliados en los gimnasios, y por encima de 200.000 atletas que participan mundialmente en 2014 [2]. El CrossFit es definido por su fundador como un programa de acondicionamiento físico y de fuerza en base a los movimientos funcionales como el levantamiento de peso, gimnasia y acondicionamiento metabólico [3]. El entrenamiento es organizado como sesiones diarias diseñadas como entrenamientos del día o WODs. Los ejercicios difieren ampliamente y son constantemente variados. Según los contenidos de los entrenamientos, hay tres modalidades: gimnasia (G), acondicionamiento metabólico (M) y levantamiento de pesas (W) [4, 5].

La modalidad de gimnasia comprende ejercicios con el peso corporal diseñados para mejorar el control del cuerpo e incluye sentadillas con el peso corporal, extensiones de brazos, pull-ups, trepada a la soga, anillas o barras paralelas, por ejemplo. Los movimientos del acondicionamiento metabólicos ofrecen poca resistencia y están diseñados para generar fatiga. Los ejercicios pueden ser aeróbicos o anaeróbicos y se organizan las sesiones como un entrenamiento intervalado (turnos de trabajo de alta intensidad entremezclados con períodos de descanso). Ejemplos son correr, remar, saltar la soga, e inclusive nadar o pedalear. La modalidad del levantamiento de pesas comprende ejercicios con carga externa incluyendo levantamientos de potencia funcionales como sentadilla o peso muerto, levantamientos olímpicos como el arranque, cargada y envión, u otros levantamientos como press trasnuca usado kettlebells, sacos de arena, medicine-ball, etc. [6]. El propósito de algunos de estos ejercicios es lograr el mejor tiempo posible mientras que para otros la meta es el mayor número de rondas durante los períodos en un rango de 10 a 20 minutos [6].

Pese a que el CrossFit se ha descrito que induce lesiones musculares incluyendo rhabdomiólisis, hay evidencia científica escasa que se vincule esta forma de entrenamiento a este riesgo [7]. En efecto, el CrossFit se ha relacionado a riesgos similares de lesión a aquellos descritos para el levantamiento de potencia, gimnasia o deportes de contacto como el rugby [8]. Sin embargo, dado que muchos ejercicios del CrossFit son técnicamente exigentes y requieren potencias altas sostenidas por más tiempo, ellos podrían provocar una fatiga considerable y podrían llevar a la lesión en las sesiones de ejercicio subsecuentes. En efecto se ha observado que la fatiga modifica la biodinámica de movimiento [9].

La fatiga muscular es definida como la incapacidad del sistema neuromuscular para producir energía alrededor de una articulación [10]. Entre los mecanismos que elevan la fatiga está la inhibición de la contracción muscular debido al aumento de los productos metabólicos residuales como el lactato [11]. Mayores concentraciones de lactato disminuyen la capacidad contráctil del músculo [12] debido a tanto la acumulación de iones de hidrógeno que reducen el pH y generando la acidosis metabólica, como también la inhibición de la fosfofructokinasa (PFK). La fatiga muscular reflejada por las variables mecánicas (la fuerza, la velocidad y la potencia), es el resultado de las propiedades contráctiles empeoradas del músculo o de su control neuromuscular [13]. Uno de los métodos más usados para cuantificar la fatiga neuromuscular en términos de variables mecánicas dadas es calcular la pérdida de la capacidad del músculo de generar potencia luego del ejercicio en el test de salto con contramovimiento (CMJ) [14, 15].

Se han investigado los posibles mecanismos que pueden producir la fatiga durante el WOD de Crossfit en un único estudio que examina los efectos de una y dos sesiones de Crossfit consecutivas sobre las respuestas metabólicas (lactato y glucosa en sangre), potencia del músculo y nivel de citocinas (IL-6, IL-10 y osteoprotegina) [16]. Así, dadas las altas demandas técnicas de algunos ejercicios de CrossFit junto con los efectos conocidos de la fatiga sobre la biodinámica del movimiento, este estudio fue diseñado para examinar los niveles de fatiga inducidos por las tres modalidades de entrenamiento de CrossFit (G, M y W), evaluando las respuestas metabólicas (concentraciones del lactato sanguíneo) y las pérdidas del rendimiento del salto de CMJ. Nuestro objetivo último fue identificar el WOD que induce más fatiga para que los programas puedan ser diseñados para evitar riesgos excesivos de lesión muscular.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño experimental al problema

Cuatro sesiones de ejercicio fueron realizadas por cada participante del estudio en el mismo día de la semana y dentro del mismo horario (± 3 horas). Cada sesión estaba separada por 1 semana de pausa. Antes de la llegada al laboratorio, los participantes fueron informados sobre los ejercicios que ellos iban a emprender en ese día. La primera sesión de ejercicio consistió en un WOD de gimnasia y la segunda sesión de un WOD de acondicionamiento metabólico. En la tercera sesión,

la carga para levantar en la cuarta sesión fue individualmente determinada en un levantamiento de 'power clean' con un test incremental para determinar la fuerza máxima para este ejercicio. Por consiguiente, una vez que la carga usada en el test del 'power clean' era determinada, el último WOD era el WOD de levantamiento de pesas. Todas las sesiones se dirigieron bajo las mismas condiciones ambientales (temperatura 21-25°C, presión atmosférica 715-730 mm Hg, humedad relativa 40-50%). Un investigador externo supervisó cada WOD para asegurar la correcta realización de cada movimiento. Todas las sesiones de CrossFit se dirigieron en el laboratorio de Fisiología del Ejercicio y Entrenamiento Deportivo de nuestra universidad. Esta instalación espaciosa está bien equipada para este tipo de ejercicios.

Sujetos

Los participantes del estudio eran 34 hombres jóvenes, sanos, todos estudiantes del curso de grado de la carrera de Ciencias del deporte y actividad física. Los datos descriptivos para estos sujetos se pueden ver en la Tabla 1. Los criterios de inclusión para la selección de los participantes eran al menos tener 6 meses de experiencia en rutinas de entrenamiento de la fuerza incluyendo levantamientos con peso libre y levantamientos olímpicos y el no uso de medicación o drogas para aumentar el rendimiento durante el estudio. Ninguno de los participantes tenía experiencia con sesiones WOD de CrossFit y los atletas de élite fueron excluidos. Estos datos fueron reunidos en una encuesta completada antes del inicio del estudio.

Tabla 1. Características antropométricas de los 34 participantes del estudio.

Variable	M ± SD
Edad (años)	22.03 ± 3.1
Peso (kg)	76.90 ± 7.1
Altura (cm)	178.65 ± 0.6
BMI (kg·m ⁻²)	23.64 ± 1.7
M±SD = Promedio (±desvío estándar)	

Los sujetos fueron instruidos a abstenerse de cualquier ejercicio físico en las 48 horas previas de cada sesión de ejercicio.

Antes del inicio del estudio, los ejercicios y los tests que los participantes tenían que emprender, fueron explicados y un consentimiento informado voluntario, por escrito fue obtenido de cada uno. El protocolo del estudio adhirió a los principios de la Declaración de Helsinki y fue aceptado por el comité de ética del Departamento de Actividad Física y Ciencias del Deporte de la Universidad Alfonso X El Sabio.

Sesión 1: WOD de gimnasia

La sesión empezó con una entrada en calor consistente en 5 minutos de carrera de baja intensidad y 5 minutos de movilidad articular y ejercicios de estiramiento dinámicos. El WOD de gimnasia era el protocolo "Cindy" [2, 17,18] que involucra la ejecución de un número máximo de series de 5 pull-ups, 10 extensiones de brazos y 15 sentadillas sin peso (sólo el peso corporal) en 20 minutos. Cada repetición de cada ejercicio tenía que ser completada para continuar a la próxima ronda, y cada ejercicio tenía que ser ejecutado apropiadamente según normas mínimas preestablecidas. Uno de los autores fue responsable de contar las rondas usando un contador manual. Las técnicas usadas para cada ejercicio eran las siguientes:

Pull-up

La posición inicial era colgando desde una barra con los codos totalmente extendidos y las manos en pronación separadas por una distancia más amplias que las caderas. Desde esta posición, el cuerpo es levantado en un movimiento doblando los codos y elevando los hombros hasta que la barbilla esté por encima de la barra. Ningún 'kipping pull ups' o 'butterfly pull ups' fue permitido ya que los participantes del estudio eran insuficientemente experimentados con estos movimientos.

Push-up

La posición inicial es con los codos totalmente extendidos y las manos en el suelo directamente bajo los hombros, con los pies juntos también tocando el suelo y el tronco y piernas totalmente extendidos. Desde esta posición, los codos se flexionan simplemente hasta tocar el suelo con el pecho y luego inmediatamente extenderse de nuevo.

Sentadilla (Air squat)

Empieza con las rodillas y las caderas rectas, los brazos cruzados sobre el pecho, los pies al ancho de los hombros y los dedos de los pies apuntando ligeramente hacia afuera, el sujeto flexiona las rodillas y las caderas hasta 120°, y desde esta posición, vuelve a la posición inicial totalmente extendida.

Sesión 2: WOD de acondicionamiento metabólico

Los sujetos emprendieron la misma entrada en calor como en la sesión 1. El ejercicio seleccionado para el WOD de modalidad M era que el de saltar la soga con doble salto ('double unders' de CrossFit) como entrenamiento intervalado de alta intensidad (HIIT). Para este ejercicio, el sujeto emprende un salto vertical alto y pasa la soga saltando dos veces bajo los pies. El WOD consistió en hacer el número máximo de 'double unders' posible en 8 series de 20 segundos con 10 segundos de pausa entre las series. Este protocolo de entrenamiento intermitente es en base a los resultados de Tabata y cols. (1996) [19]. La duración de esa prueba era de 4 minutos. En este WOD, un observador contaba el número de 'double unders' completados por serie mientras otro observador verificaba el tiempo de trabajo y pausa.

Sesión 3: Test de carga incremental del Power clean

En la tercera sesión, los pesos a ser levantados por cada sujeto en el WOD de levantamiento de pesas la siguiente semana (sesión 4) fue calculado (40% 1RM). Los sujetos realizaron un test de carga incremental del ejercicio 'power clean' para determinar la fuerza máxima de cada individuo o su 1RM.

Las mediciones de la velocidad promedio de labarra de pesas fueron hechas usando un transductor con el sistema Tendo Weight-lifting Analyzer (Trencin, República Eslovaca) que se ha validado recientemente [20].

La entrada en calor general era como fue descrito para las sesiones previas. La entrada en calor específica consistió en 2 series de 3 repeticiones de 'power clean' usando una carga de 20 kg. Luego, después de 3 minutos de pausa, el test comenzaba.

Usando una carga inicial de 20 kg, los sujetos ejecutaban una repetición del 'power clean' aumentando la carga por 10 kg en cada repetición siempre que la velocidad de la barra de pesas promedio fuera superior que 1.5 m·seg⁻¹, con un período de descanso entre repeticiones de 3 minutos. Cuando la velocidad promedio de desplazamiento de la barra era menos que 1.5 m·seg⁻¹, los aumentos de la carga eran reducidos a 5 kg y los períodos de descanso alargados a 5 minutos. El test terminaba cuando los sujetos alcanzaban su 1RM, esto es, la carga máxima levantada a través de una técnica correcta del ejercicio [21].

Una semana antes de la primera sesión, cada participante pudo practicar el 'power clean' con la ayuda de un entrenador de levantamiento de pesas calificado.

Sesión 4: WOD de levantamiento de pesas

Los sujetos realizaron el mismo precalentamiento general y específico en cuanto a las sesiones G y M. En la sesión de W, un número máximo de 'power cleans' (los levantamientos Olímpicos) se ejecutó levantando una carga equivalente al 40% de 1RM del individuo determinado en la sesión 3. La duración de la sesión era de 5 minutos. La barra de pesas usada para el 'power clean' pesaba 20 kg y a este peso, le fueron agregados discos para obtener el peso equivalente al 40% 1RM de cada sujeto. Uno de los autores fue el responsable de contar el número total de 'power cleans' completados en los 5 minutos disponibles.

Lactato sanguíneo

Antes del comienzo y al final de cada sesión de CrossFit, el mismo operador tomó una muestra de sangre (5? l) del dedo pinchado para la determinación del lactato. Las concentraciones del lactato sanguíneo fueron medidas en estas muestras usando un analizador portátil validado para este propósito, el Lactato Pro LT-1710 Arkray Factory Inc., KDK Corporation, Siga, Japón) [22, 23].

Fatiga muscular

La fatiga muscular fue medida en los miembros inferiores durante un CMJ [24] realizado en una plataforma de fuerza portátil de 92 x 92 x 12.5 cm (Quattro Jump model 9290AD; Kistler Instruments, Winterthur, Suiza). El salto comenzaba estando de pie en la plataforma con las piernas extendidas y las manos en las caderas. Para el salto, las piernas se flexionan primero a 90° (acción excéntrica) y luego se extienden explosivamente de una manera coordinada (acción concéntrica) intentando alcanzar la altura máxima. Durante la fase de vuelo, las rodillas deben extenderse. El contacto con el suelo es hecho primero con los dedos de los pies. Durante el test, se les dijo a los sujetos que mantengan sus manos en

sus caderas y evitar cualquier desplazamiento lateral durante la fase de vuelo.

Este test se realizó antes, durante y después de ejecutar cada uno de los diferentes WODs. En todas las modalidades de WOD, los tests de salto iniciales y finales se realizaron luego del precalentamiento y 3 minutos después de la finalización de la sesión, respectivamente. En estos tests, se ejecutaban tres saltos separados por 30 segundos de descanso. Para los tests de CMJ intra-sesión, un salto se realizaba respectivamente en los minutos 10 y 2.5 en los entrenamientos G y W y después de las series 2, 4, 6 y 8 en las sesiones M. El objetivo de las mediciones del salto era evaluar la capacidad de salto a lo largo de las sesiones y 3 minutos después de terminar las sesiones (Fig. 1). Para interferir lo menos posible con el WOD, uno de los observadores fue preparado para completar el test de CMJ en el menor tiempo posible. En efecto, la duración del test de intra-sesión era de alrededor 3-4 segundos. En el WOD M, se aseguró que los períodos de descanso de 10 segundos fueran ininterrumpidos.

Las mediciones de CMJ registradas eran la altura del salto (H), la potencia relativa promedio (APR), la potencia promedio total (APT), la potencia pico relativa (PPR), la potencia pico total (PPT), la velocidad del despegue máxima (V_{máx}), la fuerza máxima (F_{máx}), la tasa máxima de desarrollo de la velocidad (RVD_{pico}), la tasa máxima del desarrollo de la fuerza (RFD_{pico}), la duración del salto total y la duración de las fases excéntrica (ECC), isométrica (ISO) y concéntrica (CON).

Estas variables fueron seleccionadas porque una pérdida de la altura del salto y de la fuerza en un test de CMJ durante una sesión de ejercicio han sido usadas para indicar la fatiga neuromuscular [14]. Otras variables que se han usado para evaluar la capacidad de salto y la fatiga neuromuscular, son la duración del salto total, y la duración de las fases excéntrica y concéntrica [25, 26]. En nuestro estudio, estas duraciones fueron determinadas midiendo las fuerzas de reacción verticales durante el salto (rango 0-10 kN; frecuencia de muestreo 0.5 kHz). La plataforma de fuerza se conectaba a una PC y el paquete de software Kistler (Quattro Jump software, version 1.1.1.4) fueron usados para cuantificar las variables. Durante el salto completo, este software mide tiempo en segundos (eje X) y la fuerza expresada como el peso corporal del sujeto (eje Y). Por consiguiente, cuando el participante se paraba en la plataforma, la fuerza era 1. El salto empezaba cuando una caída abrupta en este valor de 1 (equivalente al peso del sujeto inmóvil), y esto también era el comienzo de la fase ECC. Como referencia, el primer valor mayor que -0.01 encima de 1, fue usado para cuantificar la salida del salto. El salto finalizaba cuando el sujeto detenía el contacto con la plataforma (eje X = 0). El estadio final de la fase ECC correspondió al primer pico de fuerza que casi siempre coincide con la RFD_{pico}. El final de la fase ECC determina la salida de la fase ISO que continúa hasta que una diferencia mayor que 0.009 se registrada (respecto al valor 1 del peso corporal) en la columna de fuerzas (eje Y). Finalmente, la fase CON fue tomado desde el momento cuando la fase ISO terminaba hasta el momento en el que el individuo se detiene al tomar contacto con la plataforma (eje X = 0).

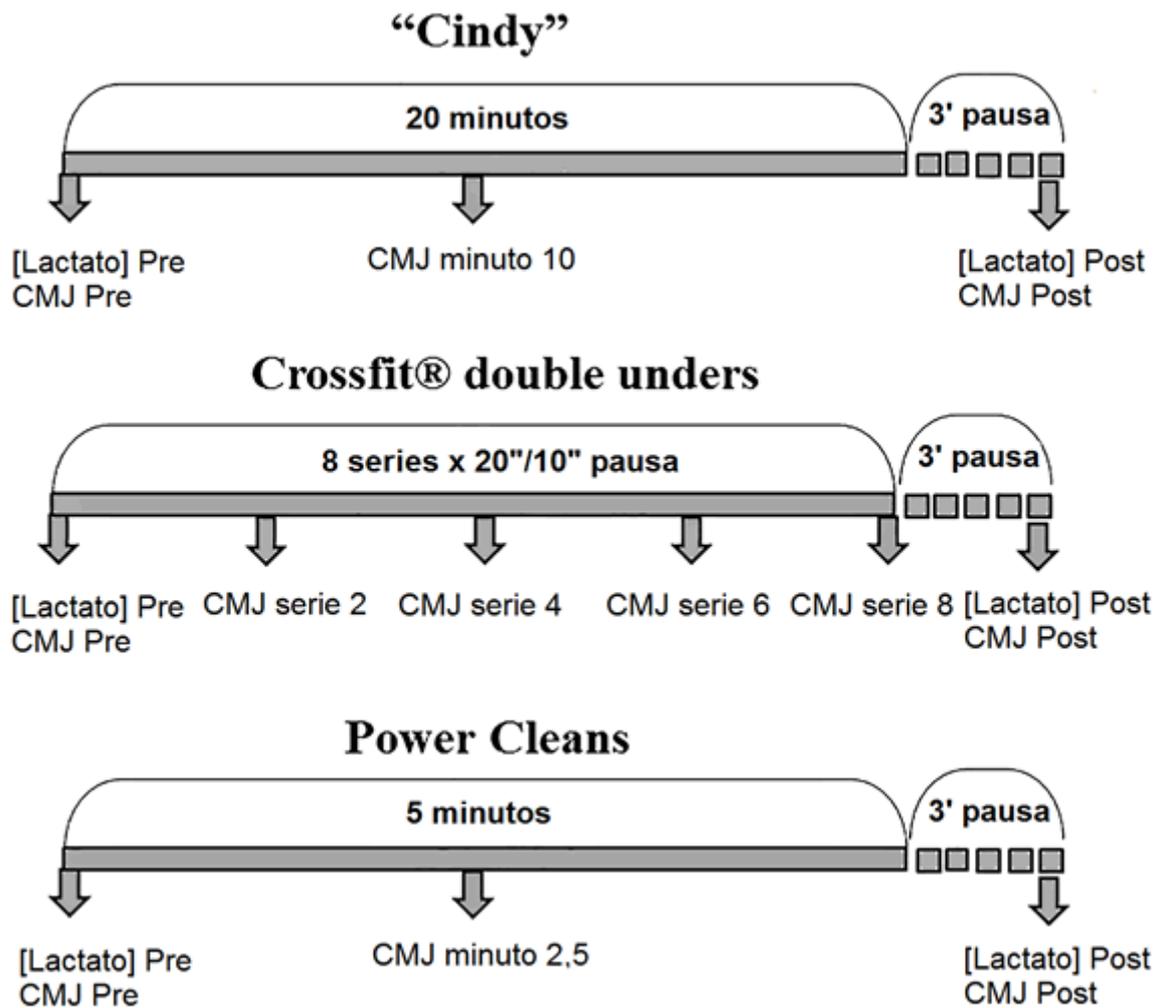


Figura 1. Tres modalidades de WOD de CrossFit; Gimnasia (Cindy), Acondicionamiento metabólico ('doble-unders' de Crossfit) y Levantamiento de pesas (Power Cleans).

La figura muestra los tiempos de trabajo y las mediciones de [Lactato] y del Salto con contramovimiento en cada WOD de Crossfit.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Inicialmente el test de Shapiro-Wilk fue usado para verificar la normalidad de los datos. Para comparar la [lactato] en los diferentes WODs de CrossFit, un test de ANOVA de dos factores fue dirigido: uno con medidas repetidas, es decir, un factor entre-sujetos, o efecto de grupo (3 niveles G, M y W) y uno con un factor intra-sujeto (2 niveles pre- y post-ejercicio). También se evaluaron los efectos de su interacción.

Para cuantificar la fatiga muscular durante las tres modalidades del CrossFit, un ANOVA de medidas repetidas fue realizado por el factor tiempo, contrastándolo usando el test de esfericidad de Mauchly. Cuando la hipótesis de esfericidad era desechada, la estadística de F invariada se usó ajustándola con el índice de corrección de Greenhouse-Geisser. Cuando se descubrían diferencias significativas entre las mediciones, el test *post-hoc* de Bonferroni fue usado.

Todos los datos se expresaron como M (promedio) y SD (desvío estándar). En todos los tests, fueron determinados el tamaño de efecto (ES) y la potencia estadística (SP). Las ganancias de porcentaje fueron calculadas usando la fórmula $[(\text{post-pre})/\text{pre} \times 100]$. La significancia fue fijada en $P < 0.05$. Todos los tests se realizaron usando el paquete SPSS para

RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los datos demográficos de los participantes del estudio (archivo S1). Los indicadores del rendimiento se pueden observar en la Tabla 2 como el número de rondas ejecutadas en el WOD de gimnasia, el número de 'double unders' completados en cada serie del WOD metabólico y el número de levantamientos realizados en el WOD de 5 minutos de levantamiento de pesas.

Tabla 2. Datos del rendimiento registrados en los tres WOD del CrossFit.

Variable	M ± SD
Nro. de rondas en G	19.59 ± 2.6
Nro. de 'Double unders' en M:	
Serie 1	13.85 ± 7.7
Serie 2	12.76 ± 7.2
Serie 3	11.71 ± 6.5
Serie 4	9.62 ± 4.9
Serie 5	10.65 ± 5.7
Serie 6	9.88 ± 5.0
Serie 7	10.21 ± 5.2
Set 8	9.35 ± 5.1
Nro. de 'Power Cleans' en W	108.85 ± 24.4

G =WOD de Gimnasia; M = WOD de Acondicionamiento metabólico; W = WOD de Levantamiento de pesas; M±SD = promedio (± desvío estándar)

Lactato sanguíneo capilar

La Tabla 3 muestra datos descriptivos de los niveles del lactato sanguíneo registrados en los tres WODs del CrossFit (archivo S2). El ANOVA de medidas repetidas descubrió diferencias significativas en la [lactato] pre- y post-ejercicio ($F = 1342.88$, $P = 0.000$, $ES = 0.931$). Para el factor grupo, se observaron también diferencias significativas ($F = 3.995$, $P = 0.021$, $ES = 0.075$), aunque ninguna diferencia surgió para la interacción Tiempo x grupo ($F = 2.620$, $P = 0.078$, $ES = 0.050$). A través de las comparaciones pares (Test *post hoc* de Bonferroni), nosotros descubrimos diferencias en esta variable entre los entrenamientos G y M ($P = 0.017$).

Tabla 3. Niveles del lactato sanguíneo apilar registrados en las 3 diferentes modalidades del CrossFit en los 34 participantes (M ±SD).

[Lactato] mmol·L ⁻¹	Pre-ejercicio	Post-ejercicio
G	1.56 ± 0.61 [†]	11.79 ± 2.33 *
M	1.30 ± 0.37	10.15 ± 3.04
W	1.22 ± 0.31	11.24 ± 2.62

G = WOD de Gimnasia; M = WOD de Acondicionamiento metabólico; W = WOD de Levantamiento de pesas.

* Diferencia significativa entre las sesiones G y M (P<0.05).

† Diferencia significativa entre las sesiones G y W (P<0.05).

La altura del salto con contramovimiento y pérdidas de la potencia pico y promedio

WOD de Gimnasia

Una reducción significativa se produjo a través de las series en la altura del CMJ ($F = 7.996$; $P = 0.003$; $ES = 0.195$, $PV = 0.886$). Una comparación *post-hoc* usando el índice de Bonferroni de los valores de la H registrados en cada serie, identificó diferencias significativas entre los valores pre- y post-ejercicio ($P < 0.01$) y ninguna diferencia entre los puntos de tiempo de pre-ejercicio y el minuto 10 ($P = 0.061$). En contraste, las diferencias significativas que emergían entre estos dos puntos de tiempo (pre-ejercicio vs minuto 10) ($P < 0.05$) para las variables PPR ($F = 5.798$; $P = 0.005$; $ES = 0.149$, $PV = 0.855$) y PPT ($F = 5.081$; $P = 0.009$; $ES = 0.133$, $PV = 0.803$), junto con las diferencias significativas en estas dos variables también entre el minuto 10 y el post-ejercicio ($P = 0.014$; $P = 0.041$ respectivamente) (archivo S3) (Tabla 4).

Tabla 4. Variables que reflejan la fatiga muscular registrada en 3 puntos de tiempo del WOD de gimnasia en los 34 participantes.

Variables	Pre-ejercicio	Minuto 10	Post-ejercicio	% de pérdida Pre-Post
H (cm)	38.06 ± 4.31 *	36.23 ± 5.90	35.60 ± 4.65	-6.46
PPR (watts kg ⁻¹)	56.48 ± 4.96 [†]	54.69 ± 5.97 [‡]	56.51 ± 5.98	0.053
PPT (watts)	4326.07 ± 498.31 [†]	4188.23 ± 548.81 [‡]	4325.036 ± 614.09	-0.016
APR (watts kg ⁻¹)	32.37 ± 3.07 *	30.51 ± 4.13	31.01 ± 4.18	-4.2
APT (watts)	2479.01 ± 291.35 *	2336.57 ± 367.48	2381.82 ± 399.71	-3.92
V _{máx} (m·s ⁻¹)	2.886 ± 0.14 *	2.811 ± 0.17	2.807 ± 0.15	-2.74
F _{máx} (N)	2021.67 ± 237.48	1973.4 ± 224.23	1934.4 ± 361.17	-4.32
Duración total (s)	0.7219 ± 0.1034 [‡]	0.4786 ± 0.1201	0.7180 ± 0.1266	-0.54
Duración ECC (s)	0.4892 ± 0.0799 [‡]	0.2439 ± 0.0891 [‡]	0.5104 ± 0.1186	+4.33
Duración ISO (s)	0.0098 ± 0.0044	0.0109 ± 0.0054	0.0109 ± 0.0039	+11.22
Duración CON (s)	0.2229 ± 0.0425 [#]	0.2239 ± 0.0597 [‡]	0.1966 ± 0.0568	-11.8
RVD _{pico} (m·s ⁻²)	4.1681 ± 0.5508	4.1337 ± 0.8453	4.0632 ± 0.628	-2.5
RFD _{pico} (N·s ⁻¹)	4235.24 ± 976.99	4150.36 ± 1113.64	3951.34 ± 1266.24	-6.7

H = altura del salto; PPR = potencia pico relativa; PPT = potencia pico total; APR = potencia promedio relativa; APT = potencia promedio total; V_{máx} = velocidad máxima de despegue; F_{máx} = fuerza máxima; ECC = fase excéntrica; ISO = fase isométrica; CON = fase concéntrica; RVD_{pico} = tasa máxima de desarrollo de la velocidad; RFD_{pico} = tasa máxima de desarrollo de fuerza; % = porcentaje

* diferencia significativa pre-ejercicio vs minuto 10 y post-ejercicio (P < 0.05).

† diferencia significativa pre-ejercicio vs minuto 10 (P < 0.05).

‡ diferencia significativa minuto-10 vs post-ejercicio (P < 0.05).

diferencia significativa pre-ejercicio vs post-ejercicio (P < 0.05).

Para las variables APR, APT y V_{máx}, también se observaron diferencias significativas entre los distintos puntos de tiempo ($F = 10.296$, $P = 0.000$, $ES = 0.238$, $PV = 0.984$; $F = 9.567$, $P = 0.000$, $ES = 0.225$, $PV = 0.976$; $F = 20.808$, $P = 0.000$, $ES = 0.387$, $PV = 0.999$, respectivamente). A través de las comparaciones de pares de Bonferroni, se observaron reducciones en estas variables para los valores pre-ejercicio vs aquellos registrados en los puntos de tiempo restantes (APR en el minuto 10, $P = 0.000$; post-ejercicio $P = 0.010$; APT en el minuto 10, $P = 0.000$, post-ejercicio $P = 0.021$; V_{máx}: minuto 10 $P = 0.000$, post-ejercicio $P = 0.000$, respectivamente) (archivo S3) (Tabla 4).

Se descubrieron diferencias significativas en la duración total de CMJ a lo largo de las tres mediciones hechas ($F = 86.875$, $P = 0.000$, $ES = 0.725$, $PV = 1.000$). Sin embargo, ninguna diferencia surgió entre los valores pre- y post-ejercicio ($P = 1.000$), aunque las duraciones de los saltos de pre-ejercicio y del minuto 10, variaron significativamente ($P = 0.000$) (archivo S4) (Tabla 4). Cuando nosotros consideramos las duraciones de cada fase de salto, ECC, ISO y CON, fue observado que la diferencia en la duración total del salto entre pre-ejercicio y el minuto 10 era mucho atribuible a la fase ECC, dadas las diferencias significativas determinadas entre las mediciones ($P = 0.000$) ($F = 113.92$, $P = 0.000$, $ES = 0.775$, $PV = 1.000$) involucrando la duración reducida de la fase ECC de pre-ejercicio al minuto 10, seguido por su

recuperación post-ejercicio sin diferencia para las duraciones de pre- vs post-ejercicio ($P = 0.699$). La duración de fase ISO mostró un aumento que excede el 11% de pre- a post-ejercicio, aunque la diferencia entre estos dos puntos de tiempo no fue significativa ($P = 0.816$). Lo mismo se observó para la fase CON entre pre-ejercicio y el minuto 10 ($P = 1.000$). Sin embargo, la duración de la fase CON cayó significativamente entre minuto 10 y post-ejercicio ($P = 0.001$) por casi el 12%, mientras las duraciones de fase ISO en estos dos puntos de tiempo fueron similares ($P = 1.000$).

WOD de acondicionamiento metabólico

Se produjeron diferencias significativas en todas las variables que indican capacidad de salto durante este tipo de ejercicio (archivo S5) (Tabla 5). Una reducción significativa se observó entre el primer punto de tiempo (pre-ejercicio) y los puntos de tiempo 2, 4, 6 y 8 para la H ($F = 14.996$, $P = 0.000$, $ES = 0.312$, $PV = 1.000$), la PPR ($F = 32.697$, $P = 0.000$, $ES = 0.498$, $PE = 1.000$), la PPT ($F = 34.913$, $P = 0.000$, $ES = 0.514$, $PV = 1.000$), APR ($F = 15.085$, $P = 0.000$, $ES = 0.314$, $PV = 1.000$), la APT ($F = 17.454$, $P = 0.000$, $ES = 0.346$, $PV = 1.000$), y la $V_{m\acute{a}x}$ ($F = 15.163$, $P = 0.000$, $ES = 0.315$, $PV = 1.000$).

Tabla 5. Variables que reflejan la fatiga muscular registradas durante las 6 series del WOD de acondicionamiento metabólico en los 34 participantes del estudio.

Variable	Pre-ejercicio	Serie 2	Serie 4	Serie 6	Serie 8	Post-ejercicio	% pérdida Pre-Post
H (cm)	37.06 ± 4.28 *	34.11 ± 4.37	33.84 ± 4.63	33.51 ± 4.63 †	34.24 ± 4.54	35.74 ± 5.34	-3.56
PPR (watts·kg ⁻¹)	55.58 ± 6.11 *	51.64 ± 6.06	51.84 ± 6.34	51.50 ± 5.75	52.87 ± 5.97	55.92 ± 6.97 ‡	0.61
PPT (watts)	4277.34 ± 553.10 *	3971.17 ± 546.13	3984.71 ± 552.00	3960.13 ± 521.78	3980.20 ± 528.12	4301.38 ± 633.19 ‡	0.56
APR (watts·kg ⁻¹)	31.83 ± 3.53 *	29.99 ± 3.42	29.59 ± 3.41	29.33 ± 3.36	29.58 ± 3.69	31.18 ± 3.94 #	-2.04
APT (watts)	2445.22 ± 312.26 *	2303.88 ± 300.76	2271.73 ± 283.65	2255.04 ± 304.67	2226.90 ± 319.36	2400.56 ± 375.02 ‡	-1.82
$V_{m\acute{a}x}$ (m·s ⁻¹)	2.843 ± 0.14 *	2.743 ± 0.15	2.754 ± 0.16	2.725 ± 0.15	2.761 ± 0.15	2.81 ± 0.17 †	-1.16
$F_{m\acute{a}x}$ (N)	1998.19 ± 229.35	2027.34 ± 237.87	1972.74 ± 204.93	1968.07 ± 268.98	1428.7 ± 842.73 £	1926.05 ± 445	-3.6
Duración total (s)	0.6851 ± 0.1478	0.6851 ± 0.1432	0.7011 ± 0.1565	0.7131 ± 0.1713	0.5417 ± 0.3398	0.6809 ± 0.1997	-0.61
Duración ECC (s)	0.4823 ± 0.0742	0.4555 ± 0.0725	0.4796 ± 0.0918	0.4883 ± 0.0978	0.3711 ± 0.2278	0.4997 ± 0.0961	+3.6
Duración ISO (s)	0.0087 ± 0.0030	0.0083 ± 0.0057	0.0084 ± 0.0043	0.0105 ± 0.0063	0.0140 ± 0.0176	0.0092 ± 0.0022	+5.75
Duración CON (s)	0.2126 ± 0.0503 §	0.2409 ± 0.0442	0.2384 ± 0.0461	0.2370 ± 0.0524	0.2270 ± 0.0654	0.2128 ± 0.0571 ¥	+0.09
RVD_{pico} (m·s ⁻²)	4.2617 ± 0.5116 £	4.1133 ± 0.4766	4.0582 ± 0.4672	3.9666 ± 0.664	3.847 ± 0.5678	4.079 ± 0.4631	-4.29
RFD_{pico} (N·s ⁻¹)	4332.34 ± 885.89	4588.22 ± 857.7 [§]	4288.17 ± 810.1	4297.33 ± 1482.8	3839.25 ± 869.9	3921.36 ± 897.1	-9.5

H = altura del salto; PPR = potencia pico relativa; PPT = potencia pico total; APR = potencia promedio relativa; APT = potencia promedio total; $V_{m\acute{a}x}$ = velocidad máxima de despegue; $F_{m\acute{a}x}$ = fuerza máxima; ECC = fase excéntrica; ISO = fase isométrica; CON = fase concéntrica; RVD_{pico} = tasa máxima de desarrollo de la velocidad;

RFD_{pico} = tasa máxima de desarrollo de fuerza; % = porcentaje
 * diferencia significativa pre-ejercicio vs series 2, 4, 6 y 8 ($P < 0.05$).
 † diferencia significativa serie 6 vs post-ejercicio ($P < 0.05$).
 ‡ diferencia significativa post-exercise vs series 2, 4, 6 y 8 ($P < 0.05$).
 # diferencia significativa post-exercise vs series 4, 6 y 8 ($P < 0.05$).
 § diferencia significativa pre-ejercicio vs series 2 y 4 ($P < 0.05$).
 ¥ diferencia significativa post-ejercicio vs series 2 y 4 ($P < 0.05$).
 Σ diferencia significativa pre-ejercicio vs series 6 y 8 ($P < 0.05$).
 £ diferencia significativa serie 2 vs serie 8 y post-ejercicio ($P < 0.05$).
 £ diferencia significativa serie 8 vs pre-ejercicio y series 2, 4 y 6 ($P < 0.05$).

Las comparaciones de pares de Bonferroni indicaron aumentos significativos producidos en el último punto de tiempo 3 minutos después de terminar la sesión de ejercicio en PPR, PPT, APT, y $V_{m\acute{a}x}$ comparado a los valores registrados en las series 2, 4, 6 y 8, mientras que para la APR esta misma diferencia se descubrió con respecto a las series 4, 6 y 8. Para la $F_{m\acute{a}x}$, las diferencias significativas ($F = 10.870$, $P = 0.001$, $ES = 0.254$, $PV = 0.949$) se observaron entre la serie 8 vs pre-ejercicio y las series 2, 4 y 6 ($P = 0.011$, $P = 0.005$, $P = 0.015$, $P = 0.018$, respectivamente).

Las duraciones totales del salto no variaron significativamente entre los diferentes puntos de tiempo del CMJ ($F = 2.296$, $P = 0.071$, $ES = 0.284$, $PV = 0.653$) (archivo S6) (Tabla 5).

Por etapa del ejercicio, tampoco se observaron diferencias en la duración de la fase ECC, aunque la altura del salto se redujo por 23% a partir de los puntos de tiempo pre-ejercicio a la serie 8. Similarmente, ninguna diferencia significativa surgió en la duración de fase ISO a través de los puntos de tiempo ($F = 1.829$, $P = 0.182$, $ES = 0.074$, $PV = 0.314$), aunque la fase ISO fue más larga en la serie 6 (por 20.7%) y 8 (por 61%) comparado a su valor de pre-ejercicio. La duración de la fase CON varía significativamente durante los saltos ($F = 3.981$, $P = 0.012$, $ES = 0.148$, $PV = 0.811$), siendo significativamente más larga en las series 2 y 4 comparado a su duración de pre-ejercicio ($P = 0.014$, $P = 0.023$, respectivamente) y significativamente más corta en estas series comparado a su duración de post-ejercicio ($P = 0.010$, $P = 0.015$, respectivamente) (archivo S6) (Tabla 5).

También se registraron diferencias significativas para los datos de la RVDpico ($F = 5.218$, $P = 0.001$, $ES = 0.185$, $PV = 0.968$). A través de las comparaciones de pares de Bonferroni, se identificaron reducciones de la RVDpico significativas de 6.9% a 9.7% desde los puntos de tiempo pre-ejercicio a las series 6 ($P = 0.022$) y 8 ($P = 0.003$), respectivamente. Estas pérdidas de la capacidad de aceleración podrían ser consistentes con la duración de la fase ISO alargada entre el pre-ejercicio y las series 6 (20.6%) y 8 (60.4%) (archivo S6) (Tabla 5).

Para la variable RFDpico, nosotros descubrimos también diferencias significativas ($F = 4.037$, $P = 0.002$, $ES = 0.149$, $PV = 0.834$), incluyendo un valor inferior para la serie 2 vs 8 ($P = 0.007$) y post-ejercicio ($P = 0.002$) y pérdidas de la fuerza explosiva de 16.3% y 14.5% respectivamente. Esta fuerza explosiva disminuida en la serie 8 y al final del ejercicio pudo, en cuanto a la RVDpico, ser influenciada por la mayor duración del componente de la fase ISO (archivo S6) (Tabla 5).

WOD de levantamiento de pesas

Durante esta sesión de ejercicio, las reducciones significativas se produjeron de pre-ejercicio a los otros puntos de tiempo (minuto 2.5 y post-ejercicio) en la mayoría de las variables usadas para medir la capacidad de salto: H ($F = 27.413$, $P = 0.000$, $ES = 0.454$, $PV = 1.000$), PPR ($F = 24.558$, $P = 0.000$, $ES = 0.427$, $PV = 1.000$), PPT ($F = 20.305$, $P = 0.000$, $ES = 0.381$, $PV = 1.000$), APR ($F = 38.995$, $P = 0.000$, $ES = 0.542$, $PV = 1.000$), APT ($F = 34.211$, $P = 0.000$, $ES = 0.509$, $PV = 1.000$), Vmáx ($F = 32.374$, $P = 0.000$, $ES = 0.495$, $PV = 1.000$) y Fmáx ($F = 26.271$, $P = 0.000$, $ES = 0.443$, $PV = 1.000$) (archivo S7) (Tabla 6).

Tabla 6. Variables que reflejan la fatiga muscular registradas en los tres puntos de tiempo en la sesión de levantamiento de pesas en los 34 participantes del estudio.

Variable	Pre-ejercicio	Minuto 2.5	Post-ejercicio	% pérdida Pre-Post
H (cm)	36.59 ± 4.04*	32.84 ± 5.26	33.90 ± 4.85	-7.35
PPR (watts kg ⁻¹)	54.58 ± 5.36 *	51.20 ± 5.78 †	53.03 ± 5.77	-2.84
PPT (watts)	4187.06 ± 535.76 *	3924.34 ± 527.88 †	4071.46 ± 519.09	-2.76
APR (watts kg ⁻¹)	30.95 ± 3.38 *	27.93 ± 4.06 †	28.66 ± 3.88	-7.4
APT (watts)	2371.27 ± 309.48 *	2140.95 ± 348.23	2198.02 ± 319.38	-7.31
Vmáx (m s ⁻¹)	2.834 ± 0.12 *	2.706 ± 0.16 †	2.745 ± 0.16	-3.14
Fmáx (N)	2021.67 ± 237.48 *	1894.76 ± 272.76	1839.4 ± 293.18	-9.02
Duración total (s)	0.7203 ± 0.0908 ‡	0.7465 ± 0.0955	0.7431 ± 0.0966	+3.17
Duración ECC (s)	0.4892 ± 0.0799	0.4790 ± 0.0793	0.5076 ± 0.0893	+3.76
Duración ISO (s)	0.0098 ± 0.0044	0.0096 ± 0.005	0.0160 ± 0.0275	+63.26
Duración CON(s)	0.2229 ± 0.0425 ‡	0.2579 ± 0.0624 †	0.2195 ± 0.0706	-1.53
RVD _{pico} (m s ⁻²)	4.1681 ± 0.5508 *	3.804 ± 0.5817	3.8357 ± 0.5089	-7.97
RFD _{pico} (N s ⁻¹)	4235.24 ± 976.993 #	3906.72 ± 1458.124	3519.724 ± 916.586	-16.9

H = altura del salto; PPR = potencia pico relativa; PPT = potencia pico total; APR = potencia promedio relativa; APT = potencia promedio total; Vmáx = velocidad máxima de despeque; Fmáx = fuerza máxima; ECC = fase excéntrica; ISO = fase isométrica; CON = fase concéntrica; RVDpico = tasa máxima de desarrollo de la velocidad; RFDpico = tasa máxima de desarrollo de fuerza; % = porcentaje
* diferencia significativa pre-ejercicio vs puntos de tiempo restantes (minuto 2.5 y post-ejercicio) ($P < 0.05$).
† diferencia significativa minuto 2.5 vs post-ejercicio ($P < 0.05$).
‡ diferencia significativa serie 6 vs post-ejercicio ($P < 0.05$).
diferencia significativa pre-ejercicio vs post-ejercicio ($P < 0.05$).

En efecto, la Vmáx y la Fmáx cayeron de sus valores de pre-ejercicio por 4.5% y 5.8% en el minuto 2.5 y por 6.3% y 9% en el minuto 5, respectivamente. Las reducciones fueron más aun marcadas para la RVDpico y RFDpico ($F = 13.471$, $P = 0.000$, $ES = 0.290$, $PV = 0.987$; $F = 9.391$, $P = 0.000$, $ES = 0.222$, $PV = 0.974$ respectivamente), diferencias que son significativas para pre-ejercicio vs minuto 2.5 ($P = 0.003$, 8.7%) y post-ejercicio ($P = 0.001$, 8%) para la RVDpico y pre- vs post-ejercicio ($P = 0.000$, -16.9%) para la RFDpico (archivo S8) (Tabla 6).

Debe recalarse que a pesar de una pérdida de la capacidad de salto al final de la sesión de ejercicio con respecto a su inicio, los saltos se potencializaron entre el minuto 2.5 y el post-ejercicio. Esto significa que hubo aumentos significativos desde la mitad del ejercicio (minuto 2.5) al final del ejercicio (3 minutos después de la realización del ejercicio) en los indicadores de la capacidad de salto PPR, ($P = 0.001$), PPT, ($P = 0.001$), APR ($P = 0.042$), y Vmáx (el $P = 0.012$). Sin embargo, sus valores se redujeron aún significativamente comparado a sus valores de pre-ejercicio por -2.84%, -2.76%, -7.4% y -3.14%, respectivamente (archivo S7) (Tabla 6).

DISCUSIÓN

Altura del salto, potencia promedio y pico, velocidad máxima de despegue

Nuestro estudio fue diseñado para examinar las respuestas metabólicas (las concentraciones del lactato sanguíneo) y las variables metabólicas que inducen la fatiga muscular (a través de capacidad de salto medida en el test de CMJ) en respuesta a tres modalidades de entrenamientos del CrossFit. Uno de los resultados de este estudio fue la alta intensidad de trabajo reflejada por los niveles del lactato sanguíneo en las tres modalidades de CrossFit, gimnasia, acondicionamiento metabólico y levantamiento de pesas. Al final de cada WOD, los niveles del lactato sanguíneo fueron por encima de 10 mmol·L⁻¹, debido a la naturaleza glucolítica de las sesiones. Sin embargo, el hallazgo principal fue los valores significativamente reducidos de H, APR, APT y V_{máx} observados 3 minutos después del final del ejercicio, lo que indica una fatiga muscular mayor para las modalidades G y W en un test de CMJ. En contraste, una pérdida significativa de la capacidad de salto en la mitad de la sesión M fue indicada por las reducciones entre los puntos de tiempo pre-ejercicio y series 2, 4, 6 y 8 en la H, PPR, PPT, APR, APT y V_{máx}. Esto indica que la fatiga empeoró durante el curso de la sesión M aunque 3 minutos de pausa después de la sesión fue suficiente para el retorno a los valores normales, diferente situación ocurrió luego de las sesiones G y W.

Este hallazgo principal de nuestro estudio podría explicarse por el metabolismo primario requerido para un CMJ a partir de los fosfágenos de alta energía [27], y su predominio en las actividades intermitentes altamente energéticas [28] como las series de salto doble con la sogá ('double unders') realizadas aquí en el WOD M. De ahí, una serie de 20 segundos de 'double unders' de CrossFit pueden vaciar en parte las reservas de fosfocreatina. Es más, los breves intervalos de pausa entre las series (10 segundos) podría significar que este vaciamiento progresaba. De esta manera, la pérdida progresiva significativa de la capacidad de salto desde el comienzo hasta la finalización de la sesión (serie 8), posiblemente fue el resultado de las reservas de la fosfocreatina depletadas como fue indicado por otros autores [27]. Dado que la resíntesis de fosfocreatina muestra una fase rápida en la que se reponen el 70% de estas reservas en los primeros 30 segundos de ejercicio, y una fase segunda que dura 3-5 minutos [29], la capacidad de salto recuperada observada aquí 3 minutos después del final del ejercicio probablemente se explica por los niveles de fosfocreatina recuperados.

Esto significa que la fatiga muscular producida durante el WOD M podría ser debida al vaciamiento de los depósitos de fosfatos de alta energía durante los saltos a la sogá, con la capacidad de salto del inicio recuperada 3 minutos después del ejercicio. Esto indica que este período de descanso es apropiado entre las series de sesiones de ejercicio de intervalos como las sesiones de M en las que se realizan ejercicios como los 'double unders'. En contraste, como la carga de entrenamiento está determinada por la intensidad y el volumen del ejercicio y el período de descanso, en nuestras sesiones G y W, los sujetos realizaban el número máximo de rondas posibles de "Cindy" y de 'power cleans', respectivamente, emprendiendo cada repetición a la velocidad máxima. Aún más, el alto volumen del ejercicio (20 y 5 minutos de ejercicio, respectivamente) y la falta de períodos de recuperación, podría significar que las demandas de estas sesiones fueran bastante altas. De este modo, a pesar de las cargas ligeras usadas en las sesiones (el peso corporal en la modalidad G y 40% de 1RM en la modalidad W), estos estímulos pueden haber sido suficientes para inducir la fatiga muscular observada. Los resultados obtuvieron en las sesiones G y W son consistentes con los resultados de Tibana y cols. (2016) [16], quienes evaluaron la potencia promedio generada al ejecutar 5 repeticiones de sentadilla con barra atrás usando una carga equivalente al 50% de 1RM. En este estudio, una marcada reducción se observó en la potencia muscular después de completar una sesión de CrossFit y los autores consideraron esta pérdida de la potencia para indicar la fatiga muscular.

Existe evidencia de que los niveles de fatiga pueden modificar la biomecánica del movimiento [9] y ejercicios que demandan técnicamente, como la sentadilla, el arranque, el 'power clean', generan tensiones y sobrecargan la articulación del hombro y la región lumbar [8]. Esto, junto con las altas intensidades y volúmenes de ejercicio significa que este nivel de fatiga mecánica en las sesiones G y M, determina una necesidad por períodos de descanso adecuados. Es más, antes de empezar este tipo de WODs de CrossFit, los individuos deberían emprender una adaptación anatómica y una fase técnica para evitar el riesgo de lesión. En un caso reportado, un adulto joven sano y entrenado fue descrito que desarrolló rhabdomiolisis después de 5 días de entrenamiento de CrossFit de alta intensidad, requiriendo su hospitalización [7].

La fatiga mecánica surge a partir de los efectos en la capacidad de la fuerza contráctil que lleva a una incapacidad para generar fuerza [15]. Entre los factores que condicionan la aparición de la fatiga muscular es el grupo muscular involucrado, la intensidad y la duración del ejercicio y el tipo de acción contráctil [30]. La alta intensidad de las sesiones G y W, involucrando el ciclo de estiramiento-acortamiento y la falta de períodos de descanso, pueden haber provocado un daño estructural en las inserciones del músculo-tendón reduciendo la rigidez músculo-tendón [31, 32] y dañando el rendimiento del CMJ [33].

Niveles del lactato sanguíneo capilar

En suma, determinado su velocidad de la contracción mayor [34], se pudieron haber reclutado las unidades motoras de tipo II preferencialmente en los WODs G y W. Estas unidades son más susceptibles de fatigarse que las unidades motoras tipo I y dependen de un metabolismo glucolítico [35]. El reclutamiento de estas unidades motoras fue confirmado por las altas concentraciones del lactato sanguíneo registradas en las sesiones G (11.79 ± 2.3 mmol·L⁻¹) y W (11.06 ± 2.7 mmol·L⁻¹). Estos resultados están en la línea con aquellos reportados por otros investigadores que examinaron las respuestas del lactato sanguíneo en un WOD de CrossFit [16].

Dado que el rendimiento del CMJ es influenciado ampliamente por las unidades motoras reclutadas [36], la fatiga de las unidades tipo II en las sesiones G y W, puede explicar la pérdida progresiva en la capacidad de salto producida. En contraste, aunque la sesión M se realizó a una intensidad alta (salto doble a la soga) también requiriendo el reclutamiento de las unidades motoras tipo II, el volumen del ejercicio fue menor (4 minutos en total) y períodos de descanso incluidos (8 intervalos de 10 segundos). Esto determinó la recuperación de la capacidad de CMJ en el minuto 3 post-ejercicio, probablemente debido al reabastecimiento de las reservas de fosfocreatina a pesar de una [lactato] final de 10.2 mmol·L⁻¹ que no activó la fatiga muscular.

Duración del salto

Para cuantificar la fatiga muscular a través de las variables mecánicas, algunos estudios se han enfocado en la duración total del salto [25, 26]. Estas investigaciones distinguen dos fases del salto: una fase negativa de movimiento (correspondiente a la fase ECC) y una fase positiva de movimiento (correspondiente a la fase CON). El inicio de la fase ECC se ha vinculado al punto de tiempo en el que el peso corporal cae por 2% [25] o 5% [26]. Esta fase termina cuando el desplazamiento angular de la rodilla alcanza el máximo [26] o cuando la velocidad neta del centro de masa es cero [25]. En ambos estudios, la fase CON fue encontrado de empezar cuando la fase ECC terminaba y continuaba hasta el despegue del salto [25, 26]. Aquí, además de estas dos fases, nosotros también medimos la fase ISO a través de las fuerzas de reacción verticales usando una plataforma de fuerza.

Nosotros observamos aquí que la duración de la fase ECC fue ligeramente superior (aunque no significativamente) en el test de CMJ realizado 3 minutos después del final de cada sesión que su valor de pre-ejercicio (G 4.3%, M 3.6%, W 3.8%). Sin embargo, en las series intermedias, se produjeron reducciones en la duración de la fase ECC de -50.1% en la sesión G, -23% (no significativo) en la serie 8 de la sesión M y -2.1% en la sesión W. Esto podría indicar un acortamiento ligero de la fase ECC en el CMJ debido a un disminuido ángulo de flexión de la rodilla al saltar en condiciones de fatiga mecánica [26]. Este reducido ángulo daría lugar a un momento menor de la fuerza alrededor de la articulación de la rodilla, ya que cuanto mayor es el brazo de palanca en la rodilla (dado por su grado de flexión), mayor será el momento de la fuerza que la rodilla necesitará resistir [37]. Además, el no-uso de energía elástica por la acción ECC significa que las estructuras pasivas necesitarán amortiguar estas cargas, aumentando posiblemente así el riesgo de lesión [13] [17]. Mientras que en las sesiones G y M, el trabajo de las piernas era esencial para las sentadillas y los 'double unders', la fatiga neuromuscular detectada en la sesión W quizás fue determinada por la pobre ejecución del 'power clean'. Este ejercicio usa más el tren superior que el tren inferior para levantar la barra con peso y esto pudo haber determinado una fase ECC adecuada en el CMJ post-ejercicio.

El mecanismo por el cual el sistema neuromuscular envía señales al sistema motor para reducir el ángulo de flexión de la rodilla podría ser una reducción en la rigidez del músculo. Esta rigidez se refiere a la capacidad de un tejido biológico de resistir la deformación y se reduce como consecuencia de la fatiga o en respuesta a cargas de trabajo sucesivas sin períodos de descanso adecuados [38]. Al contrario, la mayor rigidez potencia el ciclo de estiramiento-acortamiento [39], reduciendo la fase ISO y promoviendo un uso mejorado de la energía elástica. Es probable que la alta intensidad y el alto volumen de ejercicio y la falta de períodos de recuperación en las sesiones G y W llevaron a una rigidez muscular y tendinosa alrededor de la articulación de la rodilla [32]. Tales propiedades elásticas comprometidas de la unión músculo-tendón fueron confirmadas por la fase ISO sustancialmente alargada producida en la sesión G (11.2%) y W (63.3%) al final del ejercicio, aunque no fue significativo. En la sesión M, aumentos no significativos de la fase ISO también fueron notados en las series 6 y 8 comparado a su duración de pre-ejercicio (20.7% y 61%, respectivamente). Sin embargo, en la sesión M, aunque la intensidad del ejercicio era alta, el volumen del ejercicio no era excesivo y hubo períodos de descanso. Aun así, los impactos en el suelo de los 'double unders' de CrossFit podrían generar más estrés en los huesos, tendones y articulaciones, produciendo fatiga osteomuscular debida a la menor transmisión de información de los mecanorreceptores periféricos hacia el cerebro [40]. En contraste, la menor duración de la fase ISO de pre- a post-ejercicio (5.8%) se observó en la sesión M, y esto fue solo por las diferencias en las variables de la capacidad de salto (HS, APR, APT, PPR, PPT, V_{máx}, F_{máx}) indicando una recuperación de la fatiga 3 minutos después del final de la sesión.

RVDpico

Tal disminución del rendimiento neuromuscular debido posiblemente a un ciclo de estiramiento-acortamiento impactado se reflejaría en los resultados obtenidos para otras variables como V_{máx}, RVDpico, F_{máx}, y RFDpico. Si nosotros examinamos

que la RVDpico representa la aceleración producida desde 0 a la $V_{m\acute{a}x}$ reflejando la capacidad de un individuo de generar niveles altos de potencia hasta que la $V_{m\acute{a}x}$ sea alcanzada [41, 42], su reducción significativa se produjo en la sesión W desde pre- a post-ejercicio (-8%) y en la sesión M entre pre-ejercicio y la serie 6 (-6.9%) y 8 (-9.7%). En la sesión G, esta reducción no fue significativa (-2.5%). Este hallazgo es consistente con la disminución significativa en las variables de la potencia (APR, APT, PPR y PPT) producidas en los tres WODs del CrossFit, salvo la PPT y la PPR en la sesión G que es porque una significativa caída de pre- a post-ejercicio en la RVDpico no se produjo. Es decir, mientras que por un lado la producción de potencia cayó y no se alcanzaron niveles altos de $V_{m\acute{a}x}$ (siendo significativamente inferior post-ejercicio que pre-ejercicio en todos los tres WODs del CrossFit), por otro lado, la duración de fase ISO aumentó hasta la $V_{m\acute{a}x}$, causando una reducción en la RVDpico. Similarmente, otros estudios han descubierto que esa velocidad de acortamiento muscular condiciona la velocidad del despegue en un CMJ. Esto es crucial para el rendimiento del salto [14, 43] y podría ser el resultado de la menor potencia y la fase ISO más larga.

Puesto que la RVDpico es un factor determinante para el rendimiento deportivo, sobre todo para las actividades en las que la masa muscular y/o un objeto necesita ser rápidamente desplazado [44], la fatiga mecánica producida en la sesión G y M, debe tenerse en cuenta, puesto que esta pérdida del rendimiento puede significar que los objetivos del atleta no se logren.

Limitaciones

En este estudio, nosotros cuantificamos niveles de fatiga midiendo v distintas variables mecánicas en un test de CMJ y el rendimiento del test comparado antes, durante y después de cada WOD. Sin embargo, mientras que el rendimiento de CMJ intra-sesión provee una información útil sobre el comportamiento de las variables medidas, este test podría interferir con la ejecución normal de cada uno de los WODs. Este posible impacto se minimizó haciendo proporciones seguras de trabajo-pausa (20:10); en las sesiones M fueron desafectadas por el test de CMJ. Esto se logró poniendo al sujeto rápidamente en la plataforma de fuerza y ejecutando sólo un salto durante las sesiones G y W. Esto significó que los tests de salto de intra-sesión involucraron sólo un salto por serie en la sesión M (series 2, 4, 6, 8) y un salto en los minutos 10 y 2.5 sólo en los WODs G y W, respectivamente.

CONCLUSIONES

En conclusión, a través de la medición de variables mecánicas en un CMJ, nuestro estudio evaluó la fatiga muscular producida en respuesta a diferentes WODs del CrossFit. La fatiga muscular no se observó al final del WOD de acondicionamiento metabólico y una capacidad de salto disminuida en este tipo de WOD solamente ocurrió después de las series 2, 4, 6 y 8. Estos datos indican que mientras para una sesión de intervalos de saltos dobles con soga ('double unders'), un período de descanso de 3 minutos sería apropiado, para las otras modalidades de sesión, un período de descanso más largo es lo recomendado. Aún más, dado que en las sesiones G y W la causa de la fatiga mecánica podría ser junto con la intensidad alta y el volumen de ejercicio también una falta de intervalos de descanso, los individuos que practican estas modalidades del CrossFit deben llevar a cabo una rutina de adaptación anatómica primeramente de acuerdo a modelos de periodización de entrenamiento de la fuerza [45]. Para esta anterior fase del entrenamiento de la fuerza, nosotros recomendaríamos una adaptación progresiva de músculos, de ligamentos y sobre todo, de las inserciones del músculo en el hueso en un esfuerzo para mejorar la tolerancia al alto estrés de sesiones de CrossFit, así se reducen los riesgos de lesión. Un hallazgo más de nuestro estudio fue que la rigidez del músculo-tendón reducida relacionada a la pérdida de la capacidad para saltar en los diferentes WODs, puede haber sido el resultado de una fase ISO alargada en el CMJ. Este hallazgo también requiere la confirmación en trabajos científicos a futuro.

Información de apoyo

Archivo S1.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181855.s001> (PDF)

Archivo S2.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181855.s002> (PDF)

Archivo S3.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181855.s003> (PDF)

Archivo S4.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181855.s004> (PDF)

Archivo S5.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181855.s005> (PDF)

Archivo S6.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181855.s006> (PDF)

Archivo S7.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181855.s007> (PDF)

Archivo S8.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181855.s008> (PDF)

REFERENCIAS

1. Joondeph SA, Joondeph BC. (2013). Retinal Detachment due to CrossFit Training Injury. *Hindawi Publishing Corporation*.
2. Butcher SJ, Neyedly TJ, Horvey KJ, Benko CR. (2015). Do physiological measures predict selected CrossFit benchmark performance? *Open Access J Sports Med*. 2015; 6: 241-247.
3. Glassman G. (2007). Understanding CrossFit. *The CrossFit Journal*. 2007; 56: 1-2.
4. Dong-Hun Y. (2015). The effects of CrossFit-based Training and Weight Training on Health-related Physical Fitness, Functional Fitness and Blood lipids in Middle-Aged Men. *Exercise Science*. 2015; 24(2): 109-116.
5. Goins J, Richardson MT, Wingo J, Hodges G, Leaver-Dunn D, Leeper J. (2014). Physiological and Performance effects of CrossFit. *Med Sci Sports Exerc*. 2014; 46(5): 270.
6. Smith MM, Sommer AJ, Starkoff BE, Devor ST. (2013). CrossFit-Based High-Intensity Power Training improves Maximal Aerobic Fitness and Body Composition. *J Strength Cond Res*. 2013; 27(11): 3159-3172.
7. Hadeed MJ, Kuehl KS, Elliot DL, Sleigh A. (2011). Exertional Rhabdomyolysis after CrossFit exercise program. *Med Sci Sports Exerc*. 2011; 43(5): 224-225.
8. Hak PT, Hodzovic E, Hickey B. (2013). The nature and prevalence of injury during CrossFit training. *J Strength Cond Res*. 2013; Nov 22. *In press*.
9. Weisenthal BM, Beck CA, Maloney MD, De Haven KE, Giordano BD. (2014). Injury rate and patterns among CrossFit athletes. *Orthop J Sports Med*. 2014; 25: 2(4).
10. Rodacki ALF, Fowler NE, Bennet SJ. (2002). Vertical jump coordination: fatigue effects. *Med Sci Sports Exerc*. 2002; 34(1): 105-116.
11. McCully KK, Authier B, Olive J, Clark BJ. (2002). Muscle Fatigue: The role of metabolism. *Can J Appl Physiol*. 2002; 27(1): 70-82.
12. Smilios I, Hakkinen K, Tokmakidis SP. (2010). Power Output and Electromyographic Activity during and after a Moderate Load Muscular Endurance Session. *J Strength Cond Res*. 2010; 24(8): 2122-2131.
13. Bobbert MF, Van Soest AJ. (2001). Why do people jump the way they do? *Exerc Sport in Sci Rev*. 2001; 29(3): 95-102.
14. Sánchez-Medina L, González-Badillo JJ. (2011). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med Sci Sports Exerc*. 2011; 43 (9): 1725-1734.
15. Garnacho-Castaño MV, Domínguez R, Ruiz-Solano P, Maté-Muñoz JL. (2015). Acute physiological and mechanical responses during resistance exercise executed at the lactate threshold workload. *J Strength Cond Res*. 2015b; 29(10): 2867-2873.
16. Tibana RA, de Almeida LM, Frade de Sousa NM, Nascimento Dda C, Neto IV, de Almeida JA, et al. (2016). Two Consecutive Days of Crossfit Training Affects Pro and Anti-inflammatory Cytokines and Osteoprotegerin without Impairments in Muscle Power. *Front Physiol*. 2016; 7: 260.
17. Kliszczewicz B, Snarr RL, Esco MR. (2014). Metabolic and Cardiovascular Response to the CrossFit Workout "Cindy". *J Sport and Human Perf*. 2014; 2(2): 1-9.
18. Kliszczewicz B, Quindry J, Blessing D, Oliver G, Esco M, Taylor K. (2015). Acute Exercise and Oxidative Stress: CrossFit vs. *Treadmill Bout*. *J Hum Kinet*. 2015; 47(1): 81-90.
19. Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, et al. (1996). Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and VO₂max. *Med Sci Sports Exerc*. 1996; 28(10): 1327-1330.
20. Garnacho-Castaño MV, Lopez-Lastra S, Maté-Muñoz JL. (2015). Reliability and validity assessment of a linear position transducer. *J Sports Sci Med*. 2015; 14(1): 128-136.
21. Bosquet L, Porta-Benache J, Blais J. (2010). Validity of a commercial linear encoder to estimate bench press 1 RM from the force-velocity relationship. *J Sports Sci Med*. 2010; 9(3): 459-463.
22. McNaughton LR, Thompson D, Phillips G, Backx K, Crickmore L. (2002). A comparison of the lactate Pro, Accusport, Analox GM7 and Kodak Ektachem lactate analysers in normal, hot and humid conditions. *Int J Sports Med*. 2002; 23(2): 130-135.

23. McLean SR, Norris SR, Smith DJ. (2004). Comparison of the Lactate Pro and the YSI 1500 Sport Blood Lactate Analyzers. *Int J Appl Sports Sci.* 2004; 16: 22-30.
24. Gorostiaga EM, Asiain X, Izquierdo M, Postigo A, Aguado R, Alonso JM, et al. (2010). Vertical jump performance and blood ammonia and lactate levels during typical training sessions in elite 400-m runners. *J Strength Cond Res.* 2010; 24(4): 1138-1149.
25. Pereira G, Freitas PB, Barela JA, Ugrinowitsch C, Rodacki ALF, Kokubun E, et al. (2014). Vertical jump fatigue does not affect intersegmental coordination and segmental contribution. *Motriz.* 2014; 20(3): 303-309.
26. Rodacki ALF, Fowler NE, Bennett SJ. (2001). Multi-segment coordination: fatigue effects. *Med Sci Sports Exerc.* 2001; 33 (7): 1157-1167.
27. Skare OC, Skadberg O, Wisnes AR. (2001). Creatine supplementation improves sprint performance in male sprinters. *Scand J Med Sci Sports,* 2001; 11: 96-102.
28. Cooper R, Naclerio F, Allgrove J, Jiménez A. (2012). Creatine supplementation with specific view to exercise/sports performance: an update. *J Int Soc Sports Nutr.* 2012, 9(1): 33.
29. Tomlin DL, Wenger HA. (2001). The Relationship between Aerobic Fitness and Recovery from High Intensity Intermittent Exercise. *Sports Med.* 2001; 31(1): 1-11.
30. Millet GY, Lepers R. (2004). Alteration of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercise. *Sports Med.* 2004; 34: 105-116.
31. Horita T, Komi PV, Hamalainen I, Avela J. (2003). Exhausting stretch-shortening cycle (SSC) exercise causes greater impairment in SSC performance than in pure concentric performance. *Eur J Appl Physiol.* 2003; 88: 527-534.
32. Ishikawa M, Dousset E, Avela J, Kyrolainen H, Kallio J, Linnamo V, Komi P. V. (2006). Changes in the soleus muscle architecture after exhausting stretch-shortening cycle exercise in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2006a; 97: 298-306.
33. Ishikawa M, Komi PV, Finni T, Kuitunen S. (2006). Contribution of the tendinous tissue to force enhancement during stretch-shortening cycle exercise depends on the prestretch and concentric phase intensities. *J Electromyogr Kinesiol.* 2006b; 16(5): 423-431.
34. Korhonen MT, Cristea A, Markku A, Hakkinen K, Sipila S, Mero A, et al. (2006). Aging, muscle fiber type, and contractile function in sprint-trained athletes. *J Appl Physiol.* 2006; 101(3): 906-917.
35. Pérez M, Santalla A, Chicharro JL. (2003). Effects of electrical stimulation on VO₂ kinetics and delta efficiency in healthy young men. *Br J Sports Med.* 2003; 37(2): 140-143.
36. Bosco C, Komi PV. (1979). Mechanical characteristics and fiber composition of human leg extensor muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1979; 41 (4), 275-284.
37. Gutiérrez M. (2006). Biomecánica deportiva. Madrid: Síntesis.
38. Romero D, Tous J. (2010). Prevención de lesiones en el deporte: claves para un rendimiento deportivo óptimo. Madrid: Editorial Médica Panamericana.
39. Farley CT, Morgenroth DC. (1999). Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *J. Biomech.* 1999; 32: 267-273.
40. Maté-Muñoz JL, Moreira Reis A, López de Subijana C, Rodríguez B, Sacristán A, Ruiz-Solano P, Garnacho-Castaño MV. (2014). Respuestas cardiorrespiratorias y metabólicas al ejercicio realizado sobre una plataforma de disipación de aire. *Apunts, Med Esport.* 2014; 49 (182): 53-58.
41. Brown LE, Whitehurst M. (2003). The effect of short-term isokinetic training on force and rate of velocity development. *J Strength Cond Res.* 2003; 17(1); 88-94.
42. Murray DP, Brown LE, Zinder SM, Noffal GJ, Bera SG, Garrett NM. (2007). Effects of velocity-specific training on rate of velocity development, peak torque, and performance. *J Strength Cond Res.* 2007; 21(3): 870-874.
43. Abdessemed D, Duche P, Hautier C, Poumarat G, Bedu M. (1999). Effect of recovery duration on muscular power and blood lactate during the bench press exercise. *Int J Sports Med.* 1999; 20(6), 368-373.
44. Khamoui AV, Brown LE, Nguyen D, Uribe BP, Coburn JW, Noffal GJ, et al. (2011). Relationship between force-time and velocity-time characteristics of dynamic and isometric muscle actions. *J Strength Cond Res.* 2011; 25(1): 198-204.
45. Bompa TO. (1999). Periodization training for sports (Programs for peak strength in 35 sports). *Human Kinetics.*

Cita Original

Maté-Muñoz JL, Lougedo JH, Barba M, García-Fernández P, Garnacho-Castaño MV, Domínguez R (2017) Muscular fatigue in response to different modalities of CrossFit sessions. PLoS ONE 12(7): e0181855. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181855>