

Comparación de la sentadilla con salto usando máquina Smith y masa libre / A comparison of jump squats using Smith machine and free weight

M. Gutiérrez-Dávila, D. Marcos-Frutos, D. Morato, L. Morata, J. Manrique, C. Gutiérrez-Cruz
Departamento de Educación Física y Deportiva. Universidad de Granada

Resumen

El objeto de este estudio ha sido comparar las fuerzas de reacción, la potencia y la cinemática del centro de masas (CM) durante la ejecución de sentadilla con salto utilizando la máquina Smith (SM) y el peso libre (FW). Han participado 24 deportistas con experiencia en actividades de saltos y entrenamientos con cargas. Además de una máquina Smith, se ha utilizado una plataforma de fuerza Dinascan/IBV, a 500 Hz. Después de obtener la máxima carga para cada participante (IRM), se registraron las componentes de la fuerza de reacción (FR(X) y FR(Y)) en tres niveles de carga, con respecto a su correspondiente IRM (30%, 50% y 70%). La cinemática del CM se obtuvo a partir de la integración de la función aceleración-tiempo después de dividir la fuerza neta (FN) por la masa del sistema (m). A partir del análisis temporal y de las fuerzas de reacción se sugiere que la situación FW sería más adecuada para buscar una aproximación real a la competición, siendo un movimiento que produce un mayor control postural. La situación SM reduce el tiempo de ejecución e incrementa el impulso desarrollado durante la fase propulsiva.

Palabras clave: máquina Smith, peso libre, sentadilla con salto, plataforma de fuerzas

Abstract

The purpose of this study was to compare the reaction forces, power and the kinematics of the center of mass (CM) during the performance of jump squats using the Smith machine (SM) and the free weight (FW). In this study participated twenty-four athletes with experience in jumping activities and training with loads. In addition to a Smith machine, a Dinascan / IBV force platform has been used at 500 Hz. After obtaining the maximum load for each participant (IRM), the components of the reaction force (FR (X) and FR (Y)) were recorded in three load levels, with respect to their corresponding IRM (30 %, 50% and 70%). The kinematics of the CM was obtained from the integration of the acceleration with respect to time after dividing the net force (FN) by the mass of the system (m). From the analysis of the performance times and the reaction forces, it is suggested that the FW situation would be more suitable to look for a real approach to the competition, being a movement that produces a greater postural control. The SM situation reduces the execution time and increases the momentum developed during the propulsive phase.

Keywords: Smith machine, free weight, jump squats, force platform

Correspondencia: Marcos Gutiérrez Dávila

Facultad de Ciencias del Deporte de la Universidad de Granada. Departamento de Educación Física

Ctra. Alfacar s/n 18011- Granada, (España)

Tf. 958244367 - marcosgd@ugr.es

Introducción

El entrenamiento de fuerza ha dejado de ser una actividad específica de culturistas y halterófilos para convertirse en una de las formas más populares orientada hacia el entrenamiento deportivo, la salud o la estética corporal. Algunos de los ejercicios utilizados para el desarrollo de la fuerza requieren el desplazamiento de una masa externa usando la combinación de diferentes grupos musculares, como son el press de banca o la sentadilla con todas sus variantes. Todos ellos son ejercicios complejos que requieren un control y ejecución técnica muy precisa para aumentar su eficacia y evitar el riesgo de lesiones, especialmente con el incremento de las cargas. Para aumentar la seguridad y el control del desplazamiento de las cargas suele utilizarse la máquina Smith, que consiste en dos bastidores verticales fijos que actúan como guía restringiendo el movimiento de la carga en el plano frontal, además de facilitar el uso de sistemas de registro y permitir un bloqueo de seguridad durante el movimiento [1]. Dichas ventajas han provocado su uso generalizado para el entrenamiento y control de la fuerza.

A partir de la incorporación de estas máquinas se han considerado dos modalidades del entrenamiento de fuerza y potencia de las extremidades inferiores, especialmente cuando se realizan sentadillas o saltos donde se requiere desplazar cargas importantes sobre los hombros: a) *Peso libre* (FW), donde se requiere un cierto control del equilibrio al estar libre los tres planos de movimiento y b) *Máquina Smith* (SM), donde se mantiene un patrón de movimiento con rango definido y una trayectoria de la carga limitada en el plano frontal [2,3]. Aunque el movimiento es similar para las dos modalidades de ejecución, cada una de ellas tiene características concretas y usos diferenciados según las necesidades del entrenamiento o la capacidad de los deportistas [4,5].

La sentadilla con salto usando FW es similar al movimiento natural, requiriendo un mayor esfuerzo muscular para mantener la posición, por lo que suele ser utilizado por deportistas expertos [6,3]. Sin embargo, debido a la mayor seguridad que confiere la sentadi-

lla usando SM, esta suele utilizarse para la rehabilitación, los entrenamientos de personas con escasa experiencia o para la evaluación de la potencia en una amplia gama de deportistas, así como en programas de entrenamiento donde se busca la fatiga máxima [3,7,8,9]. Como se ha puesto de manifiesto, las dos modalidades de sentadilla podrían ser utilizadas en distintos programas de entrenamiento de fuerza, aunque es necesario considerar que los valores de referencia para seleccionar las cargas podrían ser diferentes.

Son escasas y contradictorias las investigaciones donde se compara las dos formas de ejecutar la sentadilla con salto (FW y SM). Mientras que Cotterman y col [3] y Luebbers y Fry [5], constataron un incremento de la carga en el test de repetición máxima (1RM) cuando se utiliza SM, Sheppard, Doyle y Taylor [10], utilizando plataformas de fuerza, no pudieron constatar diferencias estadísticamente significativas en la fuerza media y pico máximo con diferentes porcentajes de carga. Estos mismos autores, analizando la sentadilla con salto y cargas del 25% y 50% de su masa corporal en jugadores de voleibol, constataron una mayor potencia media cuando éstas se realizan con peso libre (FW) con respecto al uso de la máquina Smith (SM), sin que se encontraran diferencias estadísticamente significativas en el pico de potencia. Con respecto a la participación muscular, ciertas investigaciones constataron una mayor actividad muscular cuando se utilizaba FW en comparación a SM, siendo significativamente mayor la actividad de los músculos que estabilizan el tronco, el tibial anterior, bíceps femoral y el vasto medial, mientras que la actividad del vasto lateral se incrementa con el uso de la modalidad SM [11,12].

El objetivo de este estudio ha sido comparar las componentes de las fuerzas de reacción durante la ejecución de la sentadilla con salto utilizando la máquina Smith (SM) y el peso libre (FW), además de sus correspondientes efectos sobre la potencia, la velocidad y desplazamiento del centro de masa (CM). Teniendo en cuenta los antecedentes expuestos, consideramos como hipótesis que el uso de la máquina Smith incrementará la magnitud de la carga máxima soportada (1RM), el pico

máximo de las componentes vertical y horizontal de la fuerza, mientras que el tiempo de la fase propulsiva tenderá a reducirse.

Método

Aproximación experimental al problema

Para probar la hipótesis se ha utilizado un diseño de medidas repetidas donde cada participante realizó la sentadilla cargada con salto en las dos situaciones experimentales: a) utilizando el peso libre (FW) y b) con máquina Smith (SM). Dicha comparación se repitió con tres cargas diferentes con respecto a su correspondiente 1RM (30%, 50% y 70%), lo que permitió comprobar su efecto sobre las posibles diferencias entre las medias de las dos situaciones de salto (FW y SM), así como su efecto independiente en cada una de esas situaciones. Para ello, se han registrado las variables temporales del movimiento, las componentes de las fuerzas de reacción, la potencia y las variables cinemáticas del centro de masa (CM) que surgen a partir de la fuerza neta ejercida contra el suelo.

Participantes

Han participado 24 estudiantes de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte: 7 mujeres (edad=21.3±3.1 años; talla= 1.68±0.03 m; masa= 57.0±7.9 kg; IMC= 20.2±2.3 kgm⁻²) y 17 hombres (edad=22.2±2.4 años; talla= 1.77±0.06 m; masa= 73.5±7.6 kg; IMC= 23.4±2.2 kgm⁻²), utilizando para su selección el criterio de haber participado en deportes donde el salto vertical constituye una habilidad básica y haber realizado de forma regular entrenamientos con cargas (voleibol, balonmano, saltos atléticos, etc). A todos los participantes se les informó y solicitó su consentimiento para participar en este estudio siguiendo las directrices de la Comisión Ética de la Universidad de Granada.

Material y procedimiento

Se ha utilizado una máquina Smith (Multipower Fitness Line, Peroga, Murcia, España) y una plataforma de fuerza de 0.6 x 0.37 m, (Dinascan/IBV), que registraba las fuerzas de reacción a una frecuencia de 500 Hz. Para el

control de la profundidad de la sentadilla se ha utilizado una valla con altura regulable, situada detrás del participante, cuya barra horizontal fue sustituida por un elástico que informaba por contacto cuando las articulaciones de las rodillas alcanzaban 90°.

Para la toma de datos, cada participante realizó cuatro sesiones, con un periodo mínimo entre ellas de 48 horas. Las dos primeras se dedicaron a la realización de los tests de sentadilla máxima (una sesión para cada condición: 1RM-FW y 1RM-SM), alternándose el orden para cada participante (debido al riesgo de lesión se realizó la sentadilla paralela convencional sin salto). Para ello, después de un calentamiento normalizado de quince minutos, los participantes se situaban en posición erguida con la barra sobre los hombros debiendo bajar a una velocidad autoseleccionada hasta tomar contacto con el elástico y subir de nuevo hasta la posición inicial. Se realizaron 10 repeticiones para adaptarse al ejercicio y estandarizar la posición y desplazamiento en la fase de contramovimiento. A continuación, siguiendo el protocolo establecido por Cotterman y col. [3], cada participante eligió la carga que considera poder levantar un mínimo de tres veces y un máximo de siete. Tras un calentamiento específico utilizando el 50% de esa carga, se realizaron 4 repeticiones con el 75% de la carga. Después de un descanso de 2-3 minutos, se realizaron dos repeticiones consecutivas con el 1RM. Tras cinco minutos de recuperación, se incrementó la carga entre 5 y 10 kg, lo que se repitió hasta alcanzar el fallo. La masa final levantada fue considerada la máxima carga para cada condición (1RM-FW y 1RM-SM).

En las dos sesiones siguientes se registraron las componentes horizontal y vertical de las fuerzas de reacción para las dos situaciones de sentadilla con salto en los tres niveles de carga, alternándose el orden en cada participante. Para las dos situaciones (FW y SM), los participantes recibieron las instrucciones de situarse erguidos sobre la plataforma de fuerza con la barra sobre los hombros y realizar un salto vertical máximo manteniendo la misma profundidad de contramovimiento que para el test de sentadilla máxima, lo que se controlaba con el elástico a la altura seleccionada. Antes

de comenzar las sesiones de registro, se realizó un proceso de aprendizaje del modelo de sentadilla con salto (con barra sobre los hombros sin carga), dando por concluido cuando se alcanzaba una cierta estabilidad en el tiempo de ejecución [13]. A continuación, siguiendo la metodología propuesta por Gutiérrez-Dávila, Dapena, and Campos [14], se registraron cinco saltos válidos para cada condición y carga, analizándose sólo el registro cuyo tiempo de ejecución era el mediano.

Análisis de datos

Para cada ensayo se determinó el posible error sistemático procedente de la plataforma de fuerzas a partir de las medias de la componente horizontal y vertical de la fuerza de reacción de 20 registros sucesivos tras el despegue del salto. Después de restar a cada componente de la fuerza de reacción el posible error sistemático y obtener la fuerza neta vertical ($FN_{(Y)}$) restando el peso del saltador más la carga (considerado como la línea base de la componente vertical de la plataforma antes de iniciar el movimiento y después de eliminar el error sistemático), se calcularon las componentes de la aceleración vertical y horizontal del CM a partir de su correspondiente fuerza neta y la masa registrada (FN/m) para cada condición y carga. Finalmente, los sucesivos

registros de las componentes de la velocidad y sus correspondientes posiciones del CM ($v_{(X)CM}$, $v_{(Y)CM}$ y X_{CM} , Y_{CM} , respectivamente), se determinaron mediante integración de las respectivas componentes de las funciones de aceleración y velocidad-tiempo, usando para ello el método trapezoidal con un incremento temporal de 0.002 s [14].

Según el procedimiento expuesto, los datos obtenidos para las componentes horizontales de la velocidad y las sucesivas posiciones del CM no corresponderían a valores reales en la situación SM, ya que gran parte de las fuerzas horizontales que se ejercen contra el suelo son contrarrestadas por las guías verticales de la máquina Smith. Para cada incremento se determinó la potencia mediante el producto de la fuerza neta y la velocidad resultante (para la situación SM sólo se ha considerado la componente vertical).

El análisis temporal de la sentadilla con salto se dividió en tres fases siguiendo la metodología propuesta por Feltner, Bishop y Perez, [15]: a) *Contramovimiento*, que comprende desde el inicio del movimiento hasta que la velocidad vertical del CM adquiere su valor más próximo a cero (t_{0Y}); b) *Propulsión*, que comprende un periodo temporal entre t_{0Y} y el instante en que la velocidad vertical del CM alcanza su máximo valor (t_{MV}) y c): *Fase pre-*

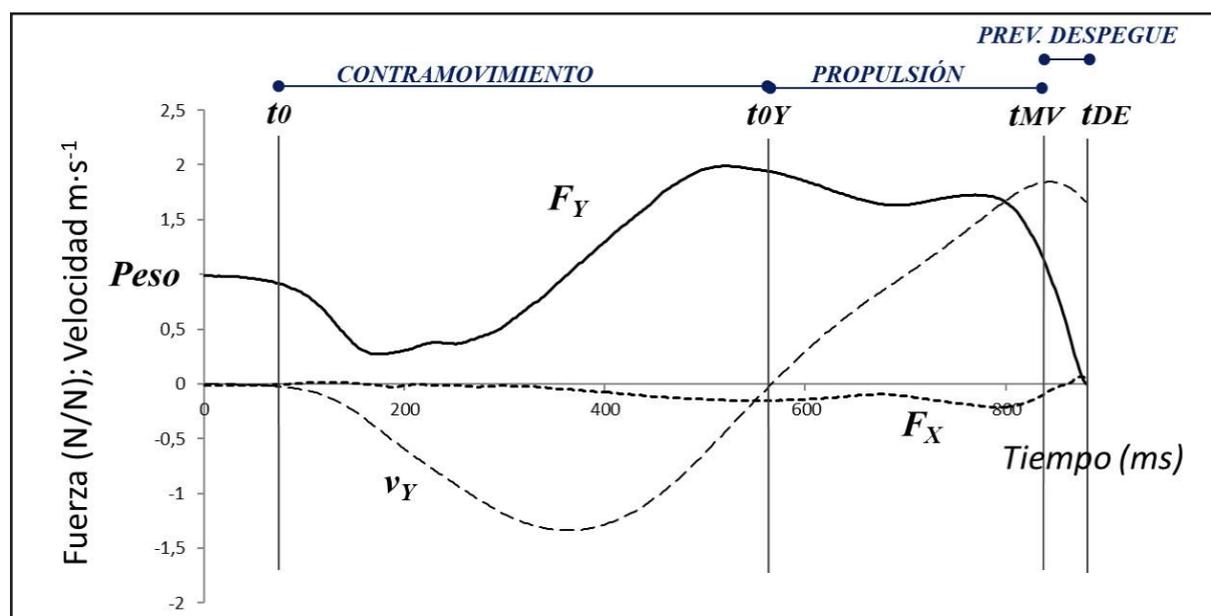


Figura 1. Análisis temporal de la sentadilla con salto correspondiente a uno de los participantes, donde la fuerza de reacción se expresa normalizada con respecto al peso del sistema.

via al despegue, comprendida entre t_{MV} y el instante de despegue (t_{DE}) (ver figura 1). El inicio del movimiento se consideró cuando la fuerza de reacción vertical experimentaba un cambio del 1% con respecto a los valores medios de reposo y el despegue coincidió cuando la fuerza de reacción vertical alcanzaba valores inferiores a ese mismo porcentaje.

Análisis estadístico

Para determinar el efecto de las dos situaciones experimentales (FW y SM) se ha aplicado una estadística descriptiva y para verificar las diferencias estadísticas entre las medias de las dos condiciones experimentales (FW y SM) se ha llevado a cabo un análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA).

Para evaluar la fiabilidad de las pruebas, se ha aplicado un análisis de varianza de medidas repetidas a todos los ensayos en las dos condiciones experimentales (cinco ensayos para cada condición y carga) tomando como variable dependiente el tiempo de ejecución del salto ($t_{SALTO(30\%)}$, $t_{SALTO(50\%)}$, $t_{SALTO(70\%)}$), sin que hayan existido diferencias significati-

vas entre los ensayos y sus respectivas situaciones experimentales. El coeficiente de correlación intraclase para estas mismas variables ha sido superior a 0.951 ($p < 0.001$) en las dos situaciones experimentales y cargas.

Resultados

En la tabla 1 se presentan los datos numéricos correspondientes a la máxima carga levantada (1RM) en las dos situaciones experimentales (FW y SM), constatándose que ésta ha sido significativamente mayor para SM ($p < 0.001$). En esta misma tabla se presenta los datos temporales de las tres fases en que se ha dividido el movimiento en las dos situaciones experimentales (FW y SM) y las tres cargas aplicadas (30%, 50% y 70% de su correspondiente 1RM). Sólo han existido diferencias estadísticamente significativas en el tiempo de propulsión, siendo superior para la condición de peso libre (FW), aunque con diferentes niveles de significación según la carga aplicada ($p < 0.001$, para el nivel del 30% 1RM y $p < 0.05$ para el 50% y 70% 1RM).

<i>Variables</i>	<i>FW</i>	<i>SM</i>	<i>Diferencia entre medias</i>	<i>F</i>
1RM (kg)	92.1 ± 19.4	106.7 ± 24.2	-14.4 ± 7.8	27.03***
Tiempo contramovimiento (s)				
30% 1RM	0.725 ± 0.100	0.707 ± 0.139	0.018 ± 0.105	0.62
50% 1RM	0.815 ± 0.138	0.791 ± 0.122	0.023 ± 0.120	0.82
70% 1RM	0.942 ± 0.221	0.963 ± 0.179	-0.021 ± 0.184	0.29
Tiempo propulsión (s)				
30% 1RM	0.392 ± 0.054	0.355 ± 0.050	0.037 ± 0.037	22.88***
50% 1RM	0.473 ± 0.058	0.445 ± 0.087	0.028 ± 0.046	7.97*
70% 1RM	0.583 ± 0.096	0.552 ± 0.106	0.031 ± 0.068	4.64*
Tiempo previo al despegue (s)				
30% 1RM	0.040 ± 0.008	0.042 ± 0.008	0.002 ± 0.009	1.08
50% 1RM	0.052 ± 0.011	0.052 ± 0.010	-0.001 ± 0.011	0.09
70% 1RM	0.064 ± 0.014	0.067 ± 0.019	-0.003 ± 0.019	0.44
*** p < 0.001; ** p < 0.01; * p < 0.05				

Tabla 1. Estadística descriptiva e inferencial del 1RM en las dos situaciones experimentales (FW y SM). A continuación, se presenta la estadística sobre los periodos temporales en las dos situaciones experimentales cuando se utilizan cargas del 30%, 50% y 70% del 1RM.

En la tabla 2 se presentan la estadística descriptiva e inferencial para el pico máximo de fuerza de reacción registrada en las componentes vertical y horizontal (PMFR(Y) y PMFR(X), respectivamente) para las dos situaciones experimentales (FW y SM) y las tres cargas aplicadas (los valores negativos de la componente horizontal indican que el sentido de la fuerza de reacción se dirige hacia atrás con respecto a la posición del participante).

Los datos indican que PMFR(Y) se incrementa con el uso de la máquina Smith (SM) con respecto al peso libre (FW), aunque sólo se han obtenido diferencias estadísticamente significativas con los niveles de carga del 50 % 1RM ($p < 0.05$) y 70 % 1RM ($p < 0.01$). Con respecto a la componente horizontal (PMFR(X)), los datos de tendencia central indican que sus valores son negativos en las dos condiciones y cargas aplicadas, incrementándose sus valores negativos de forma muy significativa cuando se utiliza la situación SM para todos los por-

centajes de carga propuestos ($p < 0.001$). En la tabla 2 también se presenta una estadística descriptiva e inferencial del pico de potencia y la potencia media durante la fase propulsiva (PP-(PROPULSIÓN) y PM(PROPULSIÓN), respectivamente), sin que hayan existido diferencias estadísticamente significativas entre las medias de ambos registros para las dos situaciones propuestas (FW y SM).

En la tabla 3 se presenta la estadística sobre las variables cinemáticas del CM que surgen a partir de las fuerzas ejercidas contra el suelo en las dos situaciones de sentadilla con salto (FW y SM). Los datos indican que el máximo valor negativo de la velocidad vertical del CM durante la fase de contramovimiento ($v_{(Y)CG-MIN}$) tiende a incrementarse cuando se utiliza SM con respecto a FW ($p < 0.05$). Para ninguna de las tres cargas aplicadas han existido diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las dos situaciones de la velocidad vertical al final de la fase propulsiva ($v_{(Y)}$)

<i>Variables</i>	<i>FW</i>	<i>SM</i>	<i>Diferencia entre medias</i>	<i>F</i>
<i>Máxima fuerza de reacción vertical - PMFR(Y) - (N)</i>				
30% 1RM	1714 ± 259	1759 ± 264	-45 ± 110	3.57
50% 1RM	1855 ± 266	1918 ± 294	-63 ± 117	6.53*
70% 1RM	2005 ± 307	2113 ± 321	-107 ± 154	10.68***
<i>Máxima fuerza de reacción horizontal - PMFR(X) - (N)</i>				
30% 1RM	-152 ± 60	-222 ± 52	70 ± 43	59.10***
50% 1RM	-154 ± 59	-229 ± 58	76 ± 47	56.55***
70% 1RM	-118 ± 78	-200 ± 62	82 ± 70	0.71***
<i>Pico de potencia en la fase propulsiva - PP-(PROPULSIÓN) - (W)</i>				
30% 1RM	1174 ± 293	1204 ± 300	-29 ± 197	0.49
50% 1RM	1049 ± 295	1062 ± 255	-13 ± 180	0.12
70% 1RM	909 ± 257	932 ± 200	-23 ± 174	0.40
<i>Potencia media en la fase propulsiva - PM-(PROPULSIÓN) - (W)</i>				
30% 1RM	461 ± 118	478 ± 112	-17 ± 59	1.79
50% 1RM	361 ± 103	382 ± 98	-20 ± 71	1.87
70% 1RM	272 ± 95	296 ± 74	-24 ± 73	2.36
*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$				

Tabla 2. Media, desviación típica y nivel de significación entre las medias de las dos situaciones de sentadilla con salto (FW y SM) para las fuerzas de reacción y la potencia desarrollada durante la propulsión.

PROPULSIÓN). Existen claras diferencias entre las medias de las tres cargas aplicadas en las dos condiciones experimentales (FW y SM) para el desplazamiento horizontal del CM al final del contramovimiento y el despegue ($S(X)$ CONTRAMOVIMIENTO y $S(X)$ DESPEGUE, respectivamente) ($p < 0.001$). En las dos variables los valores medios son positivos para la situación FW y negativos en SM (es necesario recordar que los valores negativos indican que el desplazamiento se produciría hacia atrás con respecto a la posición inicial, aunque para la situación SM, se trata de valores teóricos al no considerarse las fuerzas horizontales que ejerce el pórtico vertical de la máquina Smith).

Discusión

En primer lugar, se observan las diferencias significativas ($p < 0.001$) entre las medias de las dos situaciones para el test de sentadilla máxima (1RM- ver tabla 1), lo que supone

un incremento del 10.4% de carga cuando se utiliza la máquina Smith con respecto al peso libre. Estos datos son coincidentes con los aportados por Cotterman y col. [3] y Luebers y Fry [5], aunque las diferencias reportadas por estos autores son sensiblemente inferiores a las obtenidas en este estudio (3.6% y 9.1%, respectivamente). En consecuencia, con el mismo porcentaje aplicado, la carga seleccionada para la situación SM siempre será mayor que la utilizada para la situación FW, lo que podría justificar el incremento de las diferencias entre las medias del pico de fuerza de reacción vertical ($PMFR(Y)$) cuando aumenta el porcentaje de carga (ver tabla 2). Es necesario considerar que las fuerzas de reacción tienen en cuenta el peso del participante más el correspondiente de la carga, lo que es razonable pensar que las diferencias entre las medias de las dos situaciones experimentales (FW y SM) sean mayores con porcentajes de cargas superiores.

<i>Variables</i>	<i>FW</i>	<i>SM</i>	<i>Diferencia entre medias</i>	<i>F</i>
<i>Máximo valor negativo de la $V(Y)$ en el contramovimiento - $v(Y)CG-MIN - (ms^{-1})$</i>				
30% 1RM	-0.99 ± 0.21	-1.08 ± 0.18	0.08 ± 0.16	6.09*
50% 1RM	-0.89 ± 0.14	-0.95 ± 0.11	0.05 ± 0.12	4.55*
70% 1RM	-0.77 ± 0.16	-0.82 ± 0.14	0.05 ± 0.10	6.05*
<i>Velocidad vertical del CM al final de la fase propulsiva - $v(Y)PROPULSIÓN - (ms^{-1})$</i>				
30% 1RM	1.83 ± 0.23	1.87 ± 0.21	-0.04 ± 0.28	0.44
50% 1RM	1.63 ± 0.24	1.69 ± 0.20	-0.06 ± 0.30	0.86
70% 1RM	1.48 ± 0.25	1.55 ± 0.26	-0.07 ± 0.35	0.96
<i>Desplazamiento horizontal en el contramovimiento - $S(X)CONTRAMOVIMIENTO - (m)$</i>				
30% 1RM	0.04 ± 0.02	-0.03 ± 0.04	0.07 ± 0.06	35.36***
50% 1RM	0.04 ± 0.02	-0.04 ± 0.06	0.08 ± 0.06	40.61***
70% 1RM	0.06 ± 0.03	-0.02 ± 0.09	0.07 ± 0.11	9.50**
<i>Desplazamiento horizontal del CM en el despegue- $S(X)DESPEGUE- (m)$</i>				
30% 1RM	0.12 ± 0.04	-0.19 ± 0.12	0.31 ± 0.14	30.31***
50% 1RM	0.13 ± 0.03	-0.20 ± 0.18	0.33 ± 0.19	37.31***
70% 1RM	0.15 ± 0.07	-0.19 ± 0.20	0.34 ± 0.21	15.59***
*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$				

Tabla 3. Variables cinemáticas del CM en las dos situaciones de sentadilla con salto (FW y SM). La estadística se completa con el efecto independiente de la carga en las dos situaciones experimentales.

Posiblemente, el hallazgo más relevante de esta investigación haya sido comprobar que la utilización de las dos modalidades de sentadilla con salto (FW y SM) son movimientos diferentes que utilizan distintas estrategias de producción de fuerza, mientras que los datos relativos a su efecto son similares. Así, la velocidad vertical del CM al final de la propulsión ($v_{(Y) \text{ PROPULSIÓN}}$), el pico de potencia y la potencia media desarrollada durante la fase propulsiva (PP-(PROPULSIÓN) y PM-(PROPULSIÓN), respectivamente), no presentan diferencias estadísticamente significativas para las dos formas de ejecución en ninguna de las tres cargas aplicadas (30%, 50% y 70% 1RM).

La sentadilla con salto utilizando el peso libre (FW) se puede considerar como un movimiento de péndulo invertido cuyo CM gira hacia delante a través de un eje situado en el centro de presión (CP), que a su vez se desplaza hacia delante durante la fase propulsiva hasta el despegue. Sin embargo, con el uso de la máquina Smith, las fuerzas horizontales de reacción ejercidas por el suelo hacia atrás mantienen un apoyo constante de la carga sobre las guías verticales que limitan ese movimiento pendular CM hacia delante. De no existir ese apoyo, las fuerzas horizontales ejercidas por el suelo habrían provocado una situación clara de desequilibrio hacia atrás (ver tabla 3). Estos resultados son coherentes con las aportaciones de Gutierrez y Bahamonde [16], donde informan de un mayor rango de movimiento del tronco y las articulaciones de la cadera, rodilla y tobillo, cuando se utiliza FW con respecto a SM. Estas diferencias en los rangos de movimiento articular, como consecuencia del control postural durante el desplazamiento pendular del CM, coincidirían también con otras aportaciones [11,12], al constatar que la modalidad de peso libre produce una mayor actividad de la musculatura estabilizadora antero-posterior (A-P) (músculos del tronco y parte inferior de las piernas) en comparación con SM. Efectivamente, el movimiento pendular de rotación hacia delante del CM activaría un proceso automático de ajustes en el CP para conseguir mantener el equilibrio, además de las cocontracciones necesarias de la musculatura del tronco para mantener el CM

sobre la base de sustentación [17]. Un hecho que también tiene efecto sobre la tensión que soporta en el ligamento cruzado anterior con el desplazamiento del CM, como ponen de manifiesto Biscarini et al. [18].

Por otra parte, considerando que el desplazamiento vertical del CM estaba determinado según protocolo, el movimiento horizontal de péndulo invertido, utilizado en la modalidad FW, provocó que el espacio recorrido por el CM durante la propulsión fuese mayor con respecto a SM. La consecuencia fue un incremento temporal de la fase propulsiva (ver tabla 1). Este hecho permite considerar que la velocidad media resultante del CM durante la fase propulsiva sería similar para las dos formas de ejecutar la sentadilla con salto.

Los datos observados sugieren que la media de la velocidad vertical al final de la fase propulsiva ($v_{(Y) \text{ PROPULSIÓN}}$) es ligeramente superior para la situación SM, aunque no existieron diferencias estadísticamente significativas entre ellas para ninguna de las cargas aplicadas. Las escasas diferencias entre las medias de $v_{(Y) \text{ PROPULSIÓN}}$ podrían sugerir que el resultado de la sentadilla con salto fue similar para las dos condiciones experimentales (FW y SM), lo que sería coherente con las aportaciones de Sheppard, Doyle y Taylor [10]. Sin embargo, los distintos valores de referencia para la selección de las tres cargas, permiten sugerir que este hecho no responde a la realidad. Es necesario considerar que la magnitud de $v_{(Y) \text{ PROPULSIÓN}}$ tuvo una relación directa con el impulso neto vertical desarrollado durante la fase propulsiva ($\int FN \cdot dt$) e inversa con la masa desplazada (m), la cual es un 10.4% mayor en la condición SM con respecto a FW, para todas las cargas. En consecuencia, las escasas diferencias entre las medias de $v_{(Y) \text{ PROPULSIÓN}}$ entre las dos condiciones, indica que el impulso de propulsión vertical ha sido mayor para la situación SM, produciéndose en menor tiempo y con mayor producción de fuerza vertical.

Un análisis similar podría hacerse con los datos estadísticos expuestos sobre el pico de potencia desarrollado durante la propulsión (PP-(PROPULSIÓN) y la potencia media (PM-(PROPULSIÓN)) donde, en todas las cargas apli-

cadras, sus registros fueron superiores cuando la sentadilla con salto se realiza utilizando la máquina Smith, aunque sin alcanzar diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las dos situaciones (FW y SM). Para este análisis es necesario recordar que el cálculo fue diferente para cada situación. Para el cálculo de la potencia en la situación SM, se utilizó el producto de las componentes verticales fuerza neta y la velocidad del CM, mientras que para la situación FW se consideró el movimiento pendular hacia delante CM, obteniéndose la potencia mediante el producto de la resultante de la fuerza neta y la velocidad. De este modo, la magnitud de la potencia en la situación FW tiene el valor añadido de la componente horizontal.

La magnitud de los datos expuestos para los dos registros de potencia y las diferencias entre las medias de las dos condiciones para PM-(PROPULSIÓN), difieren de los datos reportados Sheppard y col. [10] para este mismo gesto. Consideramos que esas discrepancias residen en la metodología utilizada para el cálculo de la potencia. Partiendo de las aportaciones metodológicas expuestas por Dugan y col.[4] para el cálculo de la potencia, los datos aportados por Sheppard y col. [10], incorporan cambios metodológicos muy significativos respecto a este estudio: a) No han tenido en cuenta el movimiento horizontal de la masa para la situación FW, b) Incorporan el peso de la masa desplazada a la fuerza vertical utilizada para el cálculo, c) Para la determinación de la velocidad se utilizó un transductor de posición asociado a la barra y d) El valor de referencia para la selección de la carga fue la masa de los participantes. Las diferentes metodologías utilizadas para determinar la potencia en la sentadilla con salto constituyen una importante limitación para obtener teorías consistentes y una dificultad para el control del entrenamiento. Consideramos necesario un debate metodológico para establecer un consenso sobre los protocolos y cálculo de la potencia.

Como se esperaba, el incremento de la carga desplazada tiende a disminuir la potencia en las dos situaciones de sentadilla con salto, lo que es coherente con las aportaciones donde se pone de manifiesto que la carga optima

es el propio cuerpo y ésta se reduce con el incremento de las cargas [19,20,21].

Conclusiones y Aplicación Práctica

Los entrenamientos con cargas para el desarrollo la fuerza y potencia extensora de las extremidades inferiores, mediante la modalidad de peso libre (FW) o la máquina Smith (SM), deben utilizar valores de referencia diferentes para el cálculo de sus porcentajes. Dadas las claras diferencias encontradas en 1RM con el uso de las dos condiciones, los entrenadores deberían utilizar valores diferentes como referencia para calcular los porcentajes de carga.

Aunque aparentemente el movimiento de la sentadilla cargada con salto es similar para las dos modalidades (FW y SM), se constata que las estrategias de aplicación de la fuerza son diferentes. El control del equilibrio durante el movimiento de péndulo invertido característico de la modalidad de peso libre (FW), provoca cambios significativos en la aplicación de la componente horizontal de la fuerza con respecto a la modalidad SM. Estos cambios deberían tenerse en cuenta cuando se pretende transferir el entrenamiento a las situaciones coordinativas de los movimientos que se producen en situación real de competición.

La sentadilla con salto utilizando la máquina Smith reduce el tiempo de ejecución e incrementa el impulso desarrollado durante la fase propulsiva, con respecto a la modalidad de peso libre. Unos resultados que sugieren un cierto beneficio de esta modalidad cuando se busca desarrollar la fuerza a altas velocidades de contracción concéntrica de la musculatura extensora de las rodillas y cadera.

Quizás la mayor limitación del estudio haya sido el hecho de no haber podido registrar la fuerza de rozamiento que surge entre la barra y los bastidores verticales que actúan como guía en la máquina Smith. Dicha fuerza de rozamiento podría afectar a la velocidad de desplazamiento del CM, aunque dados los sistemas de engranaje utilizados y la alta inercia del sistema, no creemos que su magnitud pueda ser demasiado importante, aunque se trata de una fuerza que debería constarse empíricamente.

Bibliografía

1. **Arandjelovic, O.** Common variants of the resistance mechanism in the Smith machine: Analysis of mechanical loading characteristics and application to strength-oriented and hypertrophy-oriented training. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2012; 26(2), 350–363. doi: 10.1519/JSC.0b013e318220e6d2
2. **Baechle, T.R. y Earle, R.W.** *Essential Strength Training and Conditioning*. Champaign, IL: Human Kinetics, 2000.
3. **Cotterman, M.L., Darby, L.A. y Skelly, W.A.** Comparison of muscle force production using the Smith machine and free weights for bench press and squat exercises. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2005; 19(1), 169–176. doi: 10.1519/00124278-200502000-00029
4. **Dugan, E., Doyle, T., Humphries, B., Haddon C.J. y Newton, R.** Determining the optimal load for jump squats: A review of methods and calculations. *Journal of Strength & Conditioning Research* 18(3), 2004; 668–674. doi: 10.1519/00124278-200408000-00050
5. **Luebbers, P.E y Fry, A.C.** The Kansas squat test modality comparison: free weights vs. smith machine. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2006; 30(8), 2186–2193. doi: 10.1519/JSC.0000000000001404
6. **Haff, G.G.** Roundtable Discussion: Machines Versus Free Weights. *Strength & Conditioning Journal*, 2000; 22(6), 18. Doi: 10.1519/00126548-200012000-00004
7. **Loturco I., Pereira L.A., Zanetti, V., Kitamura K., Cal-Abad C.C., Kobal R. y Nakamura F.Y.** Mechanical differences between Barbell and Body Optimum Power Loads in the Jump Squat Exercise. *Journal of Human Kinetics*, 2016; 54(1): 153–162. doi: 10.1515/hukin-2016-0044
8. **Perez-Castilla, A., García-Ramos, A, Padial, P, Morales-Artacho, J.A. and Feriche, B.** Effect of different velocity loss thresholds during a power-oriented resistance training program on the mechanical capacities of lower-body muscles. *J. Sports Sciences*, 2017; 36(12), 1331–1339. doi: 10.1080/02640414.2017.1376900
9. **Cavarretta, D.J., Walter R., Bixby WR. y Hall, EE.** Machines versus Free Weights: Does Exercise Mode Influence Affect and Perceived Exertion?. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2018; 50(5S), 315–316. doi: 10.1249/01.mss.0000536120.81293.49
10. **Sheppard, J.M., Doyle, T.L.A. y Taylor, K.L.** A methodological and performance comparison of free weight and smith-machine jump squats. *Journal of Australian Strength and Conditioning*, 2008; 16(2), 5–9.
11. **Anderson, K y Behm, D.G.** Trunk muscle activity increases with unstable squat movements. *Canadian Journal Applied Physiology*, 2005; 30(1), 33–45. doi: 10.1139/h05-103
12. **Schwanbeck, S., Chilibeck, P.D. y Binsted, G. A.** comparison of free weight squat to smith machine squat using electromyography. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2009; 23(9), 2588–2592. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181b1b181
13. **Shmidt, R.A. and Lee, T.D.** *Motor Control and Learning*. Champaign: Human Kinetics, 2005. pp. 26–27.
14. **Gutiérrez-Dávila, M., Dapena, J. and Campos, J.** The effect of muscular pre-tensing on the sprint start. *Journal of Applied Biomechanics*, 2006; 22: 194–201.
15. **Felner, M.E., Bishop, E.J. y Perez, C.M.** Segmental and kinetic contributions in vertical jumps performed with and without an arm swing. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2004; 75(3), 216–230. doi: 10.0080/02701367.2004.106009155
16. **Gutierrez, A y Bahamonde, R.** Kinematic Analysis of the Traditional Back Squat and Smith Machine Squat Exercises. Presented at XXVII International Conference of Biomechanics in Sports, University of Limerick, Limerick, Ireland, 2009.
17. **Gutiérrez-Dávila, M.** *Fundamentos de biomecánica aplicada*. Madrid: Síntesis, 2015; (p-115)
18. **Bascarini, A., Benvenuti, P, Botti, F, Mastrandrea, F. y Zanuso, Silvano.** Modelling the joint torques and loadings during squatting at the Smith machine. *Journal or Sports Sciences*, 2011; 29(5), 457–469. Doi:
19. **Cormie, P., McBride, J.M. y McCaulley, G.O.** Power-time, force-time, and velocity.time curve analysis during the jump squat: Impact of load. *Journal of Applied Biomechanics*, 2008; 24(2), 112–120. doi: 10.1123/jab.24.2.112
20. **Jaric S. y Markovic G.** Leg muscle design: the maximum dynamic output hypothesis. *Medicine & Science in Sports Exercise*, 2009; 41(4), 780–787. doi: 10.1249/MSS.0b013e31818f2bfa
21. **McBride, J.M., Tyler, J.K., Hainess, T.L. y Skinner, J.** Relationship between relative net vertical impulse and jump height in jump squats performed to various squat depths and with various loads. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2010; 5(4), 484–496. doi: 10.1123/ijsp.5.4.484