

ANÁLISIS DE LA CONTRIBUCIÓN SEGMENTARIA EN LOS SALTOS VERTICALES CON CONTRAMOVIMIENTO Y SU EFECTO DEBIDO A LA RESTRICCIÓN PROPUESTA EN EL TEST DE BOSCO CMJ

Gutiérrez-Dávila, M.; Garrido, J.M.; Gutiérrez-Cruz, C.; Giles, J.

Departamento de Educación Física y Deportiva. Universidad de Granada

RESUMEN

A pesar de la coincidencia general empírica sobre los beneficios que otorga la participación segmentaria en el rendimiento del salto vertical, existen ciertas controversias sobre su explicación teórica. El objetivo de este estudio ha sido dar una explicación causal sobre los beneficios de la participación segmentaria en el salto vertical. Han participado catorce deportistas con experiencia en el salto vertical. Realizaron cinco saltos máximos con contramovimiento, analizándose aquel cuyo tiempo de vuelo era el valor mediano. Los registros de las componentes rectangulares de la velocidad y la posición del CM, se determinaron mediante integración, a partir de las respectivas componentes de la fuerza de reacción procedente de una plataforma de fuerza. Las constantes de integración se registraron a partir de la digitalización manual de las imágenes 2D procedente de una cámara de vídeo sincronizada temporalmente a la plataforma. A lo largo del movimiento, se digitalizaron siete marcadores corporales que nos permitieron registrar la contribución angular segmentaria. Los resultados confirman la teoría explicativa de la transmisión de fuerzas, así como ciertas teorías sobre la reutilización de energía en la actividad muscular extensora de los miembros inferiores. La restricción segmentaria propuesta en el protocolo de Bosco CMJ, modifica la secuencia temporal de participación segmentaria, reduce las fuerzas verticales de reacción y actúa sobre las características mecánicas musculares.

Palabras clave: biomecánica, salto vertical, plataformas de fuerza, fotogrametría 2d, coordinación

ABSTRACT

Despite the general agreement on the empirical benefits of segmental participation in vertical jumping performance, there are some controversies about its theoretical explanation. The purpose of this study was to provide a causal explanation of the benefits of segmental contribution in vertical jumping. Fourteen experienced athletes have participated in vertical jumping. They performed five maximum countermovement jumps, analyzing the vertical jumping whose flight time was the median value. The records of the rectangular components of the velocity and position of the CM were determined by integration, using the respective components of the reaction force from a force platform. The constants of integration were recorded from a manual digitization of 2D images from a time-synchronized video camera to the platform. Throughout the movement, seven markers were digitized to the body that allowed us to record the angular segmental contribution. The results confirm the theory which explains the transmission of forces and some theories about the reuse of energy in the extensor muscle activity of the lower limbs. The segmental restriction proposed in the CMJ Bosco protocol modifies the sequence of segmental participation, reduces the vertical forces of reaction and modifies the mechanical properties of the muscle.

Key Words: biomechanics, vertical jump, force platform, photogrammetry 2d, coordination

Correspondencia:

Marcos Gutiérrez-Dávila

Departamento de Educación Física. Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte

Universidad de Granada. Ctra. Alfacar s/n. 18011 Granada, España

marcosgd@ugr.es

Fecha de recepción: 4/10/2011

Fecha de aceptación: 28/11/2011

INTRODUCCIÓN

Son diversos los estudios que han puesto de manifiesto la importancia que tiene la participación segmentaria y, especialmente, la acción de los brazos, en el rendimiento de los saltos verticales con contramovimiento (Miller and East, 1960; Luhtanen and Komi, 1978; Tidow, 1990; Aragón-Vargas, 2000; Harman, Rosenstein, Frykman and Rosenstein, 1990; Feltner, Frascchetti and Crisp, 1999; Feltner, Bishop and Perez, 2004; Lees, Vanrenterghem and Clerc, 2004). A pesar de la coincidencia general empírica sobre los beneficios que otorga su participación en el desplazamiento vertical del centro de masa (CM), existen ciertas controversias sobre su explicación teórica.

La primera explicación que surge sobre este hecho se basa en el Teorema del Centro de Masas (Cromer, 1985) y la teoría sobre la transmisión de fuerzas (Payne, Slater and Telford, 1968). Así, la fuerza vertical resultante (F_R) que actúa contra el saltador tendría una relación directa con el producto de las aceleraciones verticales y las masas de los segmentos (Expresión E-1), lo que implica que cada segmento produciría una fuerza comprensiva hacia abajo que sería transmitida hasta el suelo a través de los segmentos corporales. Estas fuerzas comprensivas aumentarían el impulso vertical y, consecuentemente, la velocidad vertical del CM en el despegue se vería incrementada. Esta teoría ha sido cuestionada por Harman, et al. (1990); Dapena (1999); Feltner et al. (1999) y Feltner et al. (2004), al significar que los miembros inferiores no son rígidos para transmitir directamente las fuerzas hasta el suelo y que las fuerzas verticales desarrolladas por las aceleraciones verticales de los brazos y el tronco podrían alterar las condiciones fisiológicas de los músculos extensores de los miembros inferiores. Esta teoría también ha sido considerada por Lees et al. (2004) como una explicación demasiado simplista del problema.

$$E-1 \quad F_R = \sum_{i=1}^{i=n} a_i \cdot m_i$$

donde F_R es la fuerza resultante, a_i y m_i son las aceleraciones y las masas de cada segmento.

Dapena and Chung (1988), a partir del análisis del salto de altura, contribuyen a la génesis de una segunda teoría explicativa, basada en los trabajos de Hill (1922) y ciertas consideraciones propuestas por Komi (1984) sobre la contracción muscular. Según esta teoría, las aceleraciones verticales de los segmentos contribuirían a incrementar la velocidad de estiramiento de la musculatura extensora de los miembros inferiores, así como a reducir su posterior velocidad de acortamiento. Dos condiciones que aumentarían la tensión muscular. Aunque esta teoría ha sido ratificada

por Harman et al. (1990), Feltner et al. (1999) y Feltner et al. (2004), para los saltos verticales con contramovimiento, y recientemente por Domire and Challis (2010) para los saltos verticales sin contramovimiento, también ha sido cuestionada por Lees et al (2004), al no coincidir temporalmente la acción segmentaria con el incremento de los momentos de fuerza ejercidos por la musculatura implicada, considerando que este beneficio podría estar relacionado con el retorno de una energía elástica muscular que habría sido almacenada previamente por el incremento de la tensión producida durante la aceleración vertical de los segmentos.

Una tercera teoría fue sugerida por Dapena and Chung (1988) al explicar el efecto de la acción de brazos durante el salto de altura, así como por Harman et al. (1990) para los saltos verticales con contramovimiento. Se podría decir que esta teoría tiene su fundamento mecánico en el Principio de Conservación de la Cantidad de Movimiento, según la expresión E-2. Lees et al. (2004) la han descrito como la teoría del «tiron», según la cual, durante la fase final del salto, cuando los brazos ya han dejado de acelerarse verticalmente y alcanzan velocidades verticales superiores a las que mantienen el resto de los segmentos del cuerpo, la reducción de su velocidad vertical tiene como consecuencia el incremento de la velocidad del resto de los segmentos para mantener así constante la cantidad de movimiento del sistema.

$$E-2 \quad m_T \cdot v_{CM} = \sum_{i=1}^{i=n} v_i \cdot m_i$$

donde m_T , es la masa total; v_{CM} , la velocidad del centro de masa ; m_T y v_i y son la masa y la velocidad del centro de masa de cada segmento.

Según las consideraciones expuestas, no parece que la explicación sobre el beneficio de la acción segmentaria sea una tarea tan simple como el aplicar alguna de las teorías expuestas. Como suele ocurrir cuando se analiza el movimiento humano, las explicaciones a este hecho suelen ser más complejas, debiéndose posiblemente a diversos mecanismos que operan conjuntamente (Lees et al. 2004). En base a las consideraciones expuestas, el propósito de esta investigación ha sido contribuir al debate explicativo sobre los beneficios de la participación segmentaria en el desplazamiento vertical del CM, utilizando para ello una metodología donde se combinan datos cinemáticos procedentes de análisis de vídeo 2D y registros cinéticos, a partir de las fuerzas de reacción procedentes de una plataforma de fuerza. Un segundo objetivo ha sido tratar de identificar los cambios que se producen en el análisis cuando el salto se realiza restringiendo la participación segmentaria según el protocolo propuesto en el test de Bosco CMJ.

MÉTODO

Participantes

Han participado 14 estudiantes de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte (talla= 1.81 ± 0.05 m; masa= 74.6 ± 7.1 Kg), utilizando para su selección el criterio de haber participado en actividades deportivas donde el salto vertical constituye una habilidad básica. A todos ellos se les informó y solicitó su consentimiento para participar en este estudio siguiendo las directrices de la Comisión Ética de la Universidad de Granada.

Procedimiento

Se ha utilizado una plataforma de fuerza de 0.6 x 0.37 m, Dinascan/IBV, operando a 500 Hz, sincronizada temporalmente a una cámara de vídeo Casio EX - FH20, que registraba a 210 Hz el plano sagital de los saltos realizados sobre la plataforma. Después de realizar un calentamiento previo, utilizando un protocolo igual para todos los sujetos, recibieron las instrucciones para realizar los saltos libres con contramovimiento (CMJ+b) y los realizados con restricción segmentaria según el protocolo del test de Bosco (CMJ). En la situación CMJ+b, los sujetos debían realizar un salto máximo partiendo de una posición erguida sobre la plataforma de fuerzas utilizando libremente todos sus segmentos. En la condición CMJ, los sujetos debían realizar un salto máximo partiendo de una posición erguida con las manos sobre las crestas iliacas y con las instrucciones de mantener las manos en esa posición y el tronco erguido durante la realización del salto. Se realizó una sesión de cinco saltos válidos para cada condición, analizándose sólo el salto cuyo tiempo de vuelo era el valor mediano de los cinco saltos. El orden de las condiciones propuestas para cada sesión fue alterado entre los sujetos.

Siguiendo la metodología propuesta por Gutiérrez-Dávila, Dapena y Campos (2006), en cada ensayo se determinó el posible error sistemático procedente de la plataforma de fuerzas a partir de la media de los 20 registros sucesivos después de estabilizarse la plataforma tras el despegue. Los registros de las componentes rectangulares de la velocidad y la posición del CM, se determinaron a partir de las respectivas componentes de la fuerza de reacción procedente de la plataforma de fuerza. Para ello, después de restar a las componentes de la fuerza el posible error sistemático y el peso del sujeto (sólo para la componente vertical), se calcularon las componentes de la aceleración vertical, a partir de las respectivas componentes de la fuerza y la masa del saltador. Finalmente, los sucesivos registros de la velocidad vertical y las posiciones adoptadas por el CM ($v_{(z) CM}$, y X_{CM} , Y_{CM} , respectivamente), se determinaron mediante integración de las respectivas componentes de las funciones de aceleración-tiempo, usando para ello el método trapezoidal con un incremento

temporal de 0.002 s. Las constantes de integración se han obtenido a partir de la digitalización manual de las imágenes de vídeo, utilizado para ello un modelo mecánico de 14 segmentos, donde las masas segmentarias y las respectivas localizaciones de sus c.m., se han obtenido a partir de los valores propuestos por Zatsiorsky & Seluyanov (1983) y adaptados por Leva, (1996). El instante de despegue de la plataforma (t_{DESPEGUE}), se determinó a partir de la componente vertical de la fuerza, estimándose en 0.001 s (mitad del intervalo de registro), antes de que la fuerza tomara un valor menor de 2 N. Para el análisis de los movimientos del CM, se ha registrado una distancia radial del CM (RD_{CM}). Dicha distancia se ha definido como un vector comprendido entre la posición del CM del sujeto y un eje de giro situado en el punto medio de las coordenadas horizontales de los talones y las puntas de los pies, cuando estos están plenamente apoyados en la plataforma.

A lo largo del movimiento, se han digitalizado seis marcadores situados en el hombro (troquíter), codo (epicóndilo externo), cadera (trocánter mayor), rodilla (tuberosidad externa), tobillo (maléolo externo), parte posterior del pie y su extremo anterior, del lado derecho del saltador. Las correspondientes coordenadas planas de cada marcador fueron interpoladas a 500 Hz, utilizando splines de quinto grado (Wood and Jennings, 1979), aplicando un nivel de suavizado cero para evitar posibles errores sistemáticos. Para su conversión en datos reales se ha utilizado un sistema de referencia consistente en un cubo de 2x2x0.5 m. Los sucesivos valores de la componente vertical de la velocidad del marcador situado en la cadera ($v_{(Z)} \text{ CADERA}$) fueron calculados a partir de la primera derivada del vector posición vertical con respecto al tiempo.

Se ha utilizado el producto escalar del vector que define la posición de los cuatro segmentos (pie, pierna, muslo, tronco y brazo) y su correspondiente proyección en el eje horizontal, para determinar sus respectivas posiciones angulares. En la figura 1(a), se representan los cuatros ángulos determinados. Su correspondiente velocidad angular, para cada instante, se ha determinado a partir de la derivada de la posición angular con respecto al tiempo. Finalmente, se ha determinado el factor de contribución angular al desplazamiento vertical de cada segmento (FCA) mediante el producto de la velocidad angular y el coseno del ángulo, para cada instante. En la figura 1(b) se representa gráficamente el significado de dicho factor.

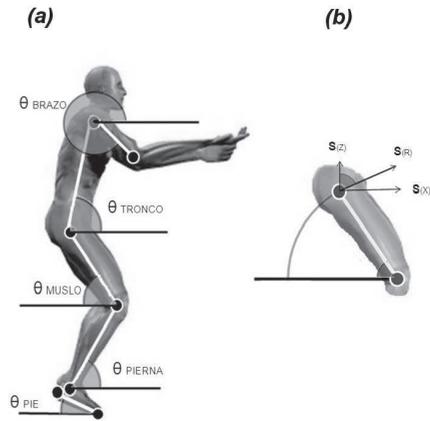


FIGURA 1: Representación gráfica de los cuatro ángulos determinados para este estudio (a) y esquema del significado que tiene el factor de contribución angular al desplazamiento vertical de cada segmento (b), donde $S_{(R)}$ corresponde al desplazamiento de los marcadores distales y $S_{(X)}$ y $S_{(Z)}$, corresponden a las componentes rectangulares horizontal y vertical del desplazamiento, respectivamente.

Para el análisis detallado del movimiento, se ha utilizado la metodología propuesta por Feltner et al. (2004) para los saltos verticales con contramovimiento. Así, se han definido tres fases:

- a) Contramovimiento, que comprende desde el inicio del movimiento hasta que se alcanza la mínima distancia radial (t_{0V}).
- b) Propulsión, que comprende un periodo temporal entre t_{0V} y el instante en que la velocidad vertical del CM alcanza su máximo valor (t_{MV}).
- c) Fase previa al despegue, comprendida entre t_{MV} y el instante de despegue ($t_{(DESPEGUE)}$).

En la Figura 2 se representan las citadas fases, junto a la fuerza vertical, normalizada con respecto al peso corporal, ($F_{(Z)}$) y las componentes verticales de las velocidades del CM y cadera ($v_{(Z) CM}$, $v_{(Z) CADERA}$, respectivamente) para uno de los sujetos analizados. En la figura 2 también se puede observar como la fase de contramovimiento se ha dividido en dos periodos temporales:

- a.1) Periodo de contramovimiento inicial, que comprende desde el inicio del movimiento hasta el instante donde la velocidad vertical del CM alcanza su máximo valor negativo (t_{NV}).
- a.2) Periodo de contramovimiento final, que comprende desde t_{NV} hasta t_{0V} .

Dadas las dificultades para determinar el inicio del movimiento, no se ha analizado el periodo de contramovimiento inicial. Para un análisis detallado, la fase de propulsión se ha dividido en tres periodos temporales iguales:

- b.1) Periodo de propulsión inicial, comprendido entre t_{0V} y t_1 .
- b.2) Periodo de propulsión medio, comprendido entre t_1 y t_2 .
- b.3) Periodo de propulsión final, comprendido entre t_2 y t_{MV} . donde $t_1 = t_{0V} + 1/3(t_{MV} - t_{0V})$ y $t_2 = t_{0V} + 2/3(t_{MV} - t_{0V})$.

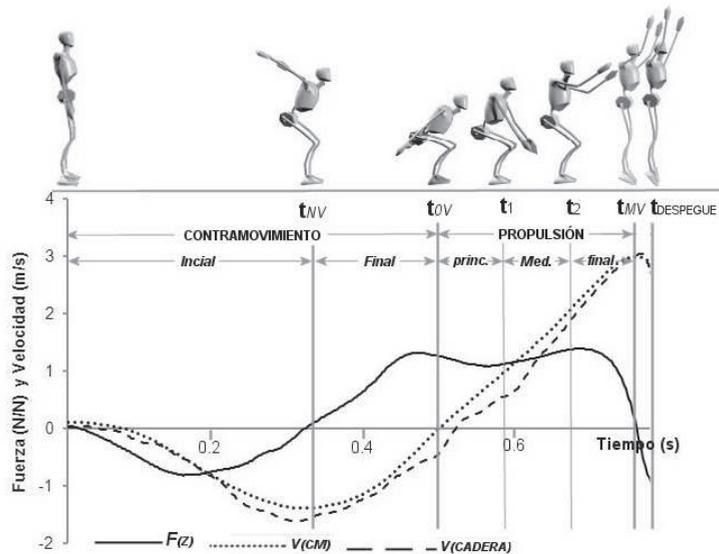


FIGURA 2: Representación gráfica de la fuerza vertical ($F(z)$), expresada en Newton de fuerza por Newton de peso corporal y las componentes verticales de las velocidades del CM y cadera ($V_{(CM)}$ y $V_{(CADERA)}$, respectivamente), con respecto al tiempo, así como las fases y periodos en los que se ha dividido el salto vertical con contramovimiento.

Análisis de datos

Para el tratamiento estadístico de los datos se ha utilizado el software Statgraphics 5.1 de Statistical Graphics Corporation, aplicando una estadística descriptiva y un análisis de varianza de medidas repetidas (multifactorial ANOVA) para determinar las posibles diferencias entre las medias de las variables para los dos tipos de saltos analizados (CMJ+b y CMJ).

RESULTADOS

Como se esperaba, la altura del CM en el despegue ($H_{CM(DESPEGUE)}$) y el desplazamiento vertical del CM tras el despegue ($S_{(Z)CM VUELO}$), se incrementan de forma muy significativa cuando el salto se realiza sin restricción segmentaria ($p < 0.001$; ver tabla 1). La altura alcanzada por el CM en el instante en que se produce la mínima distancia radial ($H_{CM MIN}$) es significativamente menor cuando el salto se realiza

sin restricción segmentara ($p < 0.01$). El tiempo de la fase de propulsión ($t_{\text{PROPULSIÓN}}$) también ha sido significativamente mayor para los saltos realizados sin restricción segmentaria ($p < 0.01$), mientras que no han existido diferencias estadísticamente significativas en la fuerza media desarrollada durante esa misma fase ($F_{m(Z)}$ (PROPULSIÓN)).

TABLA 1
Estadística descriptiva e inferencial de las variables generales relacionadas con la contribución segmentaria. Los valores de la fuerza se han expresado en Newton de fuerza por Newton de peso corporal.

VARIABLES	CMJ	CMJ+b	F
$H_{CM}(\text{DESPEGUE})$ (m)	1.17 ± 0.06	1.25 ± 0.07	25.77***
$S_{(Z)CM}$ VUELO (m)	0.31 ± 0.05	0.42 ± 0.07	86.22***
H_{CM} MIN.	0.75 ± 0.07	0.71 ± 0.09	11.45**
$t_{\text{CONTRAM. FINAL}}$ (s)	0.176 ± 0.035	0.179 ± 0.052	0.05
$t_{\text{PROPULSIÓN}}$ (m)	0.226 ± 0.031	0.266 ± 0.034	19.13**
$F_{m(Z)}$ (CONTRAM. FINAL) (N/N)	0.59 ± 0.22	0.68 ± 0.23	0.90
$F_{m(Z)}$ (PROPULSIÓN) (N/N)	1.21 ± 0.19	1.22 ± 0.19	0.14

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$;

En la tabla 2, se presenta la fuerza vertical ($F_{(Z)}$), así como las velocidades verticales del CM y del marcador situado en la cadera ($v_{(Z)CM}$ y $v_{(Z)CADERA}$, respectivamente) en los cinco instantes que definen los periodos analizados, para los saltos CMJ+b y CMJ. Para los saltos CMJ+b, los datos de tendencia central para $F_{(Z)}$ se incrementa hasta t_{0V} , a continuación tienden a descender en t_1 y vuelven a incrementarse en t_2 , lo que representaría una gráfica de fuerza-tiempo, con dos prominencias y un cierto valle entre ellas, mientras que para CMJ, $F_{(Z)}$ tiende a incrementarse desde t_{NV} hasta t_2 , desapareciendo la primera prominencia (ver figura 3). En las dos condiciones de salto, la velocidad vertical del CM y de la cadera se incrementan hasta t_{MV} y reducen su velocidad durante el periodo previo al despegue una media de 0.1 ms^{-1} y 0.14 ms^{-1} , para $v_{(Z)CM}$ y $v_{(Z)CADERA}$, respectivamente. Las diferencias entre los valores medios de estas dos variables ($v_{(Z)CM} - v_{(Z)CADERA}$) tiende a incrementarse hasta t_2 para las dos condiciones de salto, aunque las diferencias son mayores para la situación de salto CMJ+b. En la tabla 2, también se presentan los valores medios correspondientes a los factores de contribución angular al desplazamiento vertical de cada segmento (FCA). Para la condición CMJ+b, se puede observar como la contribución de tronco cambia, de tener valores medios negativos en t_{NV} , a valores positivos relativamente altos en t_{0V} . Por el contrario, en la situación CMJ, la contribución del tronco en t_{0V} sigue siendo negativa, manteniendo, a partir de ese instante, valores medios similares a los descritos para los saltos CMJ+b.

Otro aspecto a destacar es la contribución que realizan los brazos en los saltos CMJ+b, alcanzado su valor negativo más alto en t_{0V} y cambiando su valor a positivo entre los instantes t_1 y t_2 , es decir, durante el periodo medio de la fase de propulsión. En las dos situaciones, la máxima contribución del muslo se produce en t_2 y la contribución de la pierna y el pie en t_{MV} .

TABLA 2

Estadística descriptiva sobre la fuerza vertical ($F_{(z)}$), expresados en Newton de fuerza por Newton de peso corporal; las velocidades verticales del CM y del marcador situado en la cadera ($v_{(z)CM}$ y $v_{(z)CADERA}$, respectivamente) y los factores de contribución angular al desplazamiento vertical de los segmentos ($FCA_{(z)}$), en los cinco instantes que definen los periodos analizados y para los saltos sin restricción segmentaria (CMJ+b) y cuando se realizan utilizando el protocolo de Bosco (CMJ).

CMJ+b						
VARIABLES	t_{NV}	t_{0V}	t_1	t_2	t_{MV}	$t_{DESPEGUE}$
$F_{(z)}$ (N/N)	0.01±0.02	1.18±0.15	1.12±0.16	1.51±0.17	0.13±0.08	-0.82±0.09
$v_{(z)CM}$ (ms^{-1})	-1.15±0.18	0.00±0.00	0.91±0.08	1.96±0.12	2.97±0.22	2.87±0.24
$v_{(z)CADERA}$ (ms^{-1})	-1.43±0.16	-0.08±0.02	0.49±0.13	1.43±0.23	2.99±0.18	2.85±0.21
$FCA_{(z)TRONCO}$	-0.64±0.49	1.29±0.51	0.51±0.38	0.79±0.32	0.59±0.19	0.37±0.12
$FCA_{(z)BRAZOS}$	-0.38±0.46	-12.03±4.09	-2.37±0.98	14.13±0.41	5.32±2.89	2.06±1.10
$FCA_{(z)MUSLO}$	-1.31±1.05	0.49±0.30	0.85±0.41	2.09±0.42	2.01±0.38	0.71±0.48
$FCA_{(z)PIERNA}$	-0.73±0.23	-0.84±0.42	0.23±0.26	1.25±0.26	2.61±0.23	1.67±0.33
$FCA_{(z)PIE}$	0.19±0.22	0.67±0.58	0.72±0.58	0.26±0.19	6.6±1.17	6.04±2.02
CMJ						
$F_{(z)}$ (N/N)	-0.25±0.05	1.21±0.13	1.22±0.18	1.39±0.13	0.13±0.05	-0.82±0.09
$v_{(z)CM}$ (ms^{-1})	-0.98±0.21	0.00±0.00	0.94±0.06	1.92±0.05	2.77±0.21	2.66±0.30
$v_{(z)CADERA}$ (ms^{-1})	-1.18±0.30	-0.03±0.01	0.68±0.17	1.61±0.27	2.82±0.18	2.68±0.27
$FCA_{(z)TRONCO}$	-0.40±0.21	-0.73±0.81	0.56±0.34	0.68±0.21	0.41±0.19	0.28±0.15
$FCA_{(z)MUSLO}$	-1.41±0.31	0.43±0.32	1.46±0.82	2.22±0.48	1.68±0.55	0.45±0.35
$FCA_{(z)PIERNA}$	-0.54±0.32	-0.48±0.38	0.28±0.31	1.19±0.28	2.65±0.45	1.68±0.42
$FCA_{(z)PIE}$	0.09±0.29	0.66±0.89	0.53±0.49	0.68±0.54	6.81±1.28	6.26±2.23

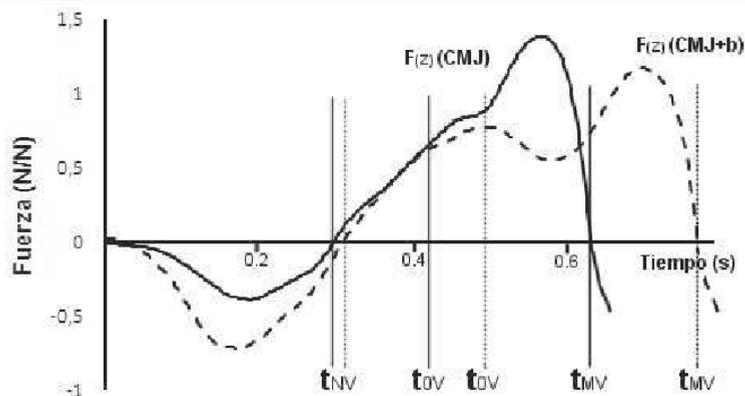


FIGURA 3: Diferencias, para uno de los sujetos, entre los registros de fuerza vertical durante saltos realizados con restricción segmentaria (CMJ) y sin restricción (CMJ+b). La fuerza vertical se ha expresado en Newton de fuerza por Newton de peso corporal.

Con el propósito de determinar las diferencias entre las dos condiciones de salto propuestas, en la tabla 3 se presentan los datos de tendencia central, junto a un análisis de varianza de medidas repetidas para $F_{m(Z)}$ y los desplazamientos verticales del CM y la cadera ($S_{(Z) CM}$ y $S_{(Z) CADERA}$, respectivamente) para los periodos temporales analizados. En el periodo final de la fase de contramovimiento, se han encontrado ciertas diferencias entre las medias de $S_{(Z) CADERA}$ de las dos condiciones de salto ($p < 0.05$), alcanzando mayores valores negativos cuando del salto se realiza sin restricción segmentaria. Durante el periodo inicial de la fase de propulsión, el desplazamiento vertical de la cadera ($S_{(Z) CADERA}$) es significativamente mayor para la condición CMJ ($p < 0.001$). Esta tendencia se mantiene durante el periodo medio de propulsión. Por el contrario, durante este periodo, el desplazamiento del CM ($S_{(Z) CM}$), es significativamente mayor para la condición CMJ+b ($p < 0.01$). Durante la fase final de propulsión, la fuerza media ha sido significativamente superior para la condición CMJ+b ($p < 0.01$), así como los correspondientes desplazamientos verticales del CM y la cadera ($p < 0.001$). En la tabla 3 también se presentan los valores medios del factor de contribución angular para los brazos y aquellos segmentos que han obtenido cierta significación estadística entre sus medias. En el periodo final de la fase de contramovimiento, la contribución media de la pierna ($FCA_{(Z) PIERNA}$) ha alcanzado valores significativamente mayores para la condición CMJ+b ($p < 0.01$). Este hecho se repite durante el periodo inicial de la fase de propulsión. Durante este periodo inicial, el valor medio de $FCA_{(Z) TRONCO}$ ha sido significativamente mayor para la situación CMJ+b ($p < 0.05$), mientras que la contribución media de $FCA_{(Z) MUSLO}$ ha sido significativamente mayor para la condición CMJ, una tendencia que se mantiene durante el periodo medio de la fase de propulsión. Es, en este periodo medio de propulsión, donde los brazos comienzan su contribución positiva. Finalmente, durante el periodo final de la fase de propulsión, el valor medio de $FCA_{(Z) TRONCO}$ ha sido significativamente mayor para la situación CMJ+b ($p < 0.05$) y los brazos alcanzan su mayor contribución media.

Tabla 3

Estadística descriptiva e inferencial entre las medias de los dos tipos de saltos analizados, para la fuerza media ($F_{m(z)}$), expresada en Newton de fuerza por Newton de peso corporal; los desplazamientos verticales del CM y la cadera ($S_{(z)CM}$ y $S_{(z)CADERA}$, respectivamente) y los factores de contribución angular de los segmentos al desplazamiento vertical ($FCA_{(z)}$), durante los periodos temporales analizados.

Variables	CMJ	CMJ+b	F
<i>Final contramovimiento</i>			
$S_{(z)CM}$ (m)	-0.05 ± 0.02	-0.06 ± 0.02	3.56
$S_{(z)CADERA}$ (m)	-0.07 ± 0.03	-0.11 ± 0.03	5.80*
$FCA_{(z)}$ TRONCO	-0.13 ± 0.11	0.67 ± 0.46	7.78*
$FCA_{(z)}$ PIERNA	-0.33 ± 0.32	-0.78 ± 0.23	18.32**
<i>Propulsión (Inicial)</i>			
$F_{m(z)}$ (N/N)	1.27 ± 0.26	1.15 ± 0.17	3.08
$S_{(z)CM}$ (m)	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01	1.63
$S_{(z)CADERA}$ (m)	0.04 ± 0.01	0.01 ± 0.01	22.8***
$FCA_{(z)}$ TRONCO	0.39 ± 0.23	0.90 ± 0.42	5.05*
$FCA_{(z)}$ BRAZOS	0.00 ± 0.00	-7.11 ± 2.01	Cond.
$FCA_{(z)}$ MUSLO	1.22 ± 0.31	0.67 ± 0.24	5.98*
$FCA_{(z)}$ PIERNA	0.10 ± 0.22	-0.31 ± 0.28	10.80**
<i>Propulsión (Medio)</i>			
$F_{m(z)}$ (N/N)	1.29 ± 0.26	1.31 ± 0.25	0.18
$S_{(z)CM}$ (m)	0.13 ± 0.02	0.15 ± 0.03	11.66**
$S_{(z)CADERA}$ (m)	0.13 ± 0.02	0.09 ± 0.03	10.46**
$FCA_{(z)}$ BRAZOS	0.00 ± 0.00	5.98 ± 2.16	Cond.
$FCA_{(z)}$ MUSLO	2.21 ± 0.43	1.47 ± 0.29	8.23*
<i>Propulsión (Final)</i>			
$F_{m(z)}$ (%)	0.70 ± 0.13	0.82 ± 0.14	11.3**
$S_{(z)CM}$ (m)	0.15 ± 0.03	0.24 ± 0.04	65.52***
$S_{(z)CADERA}$ (s)	0.21 ± 0.06	0.25 ± 0.06	20.27***
$FCA_{(z)}$ TRONCO	0.42 ± 0.09	0.69 ± 0.19	6.18*
$FCA_{(z)}$ BRAZOS	0.00 ± 0.00	9.72 ± 1.72	Cond.

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

DISCUSIÓN

Los datos expuestos confirman el hecho de que la altura alcanzada por el CM es mayor cuando los saltos se realizan sin restricción segmentaria. Del análisis comparado se constata que esta diferencia se debe al mayor tiempo de aplicación de fuerzas, mientras que la fuerza media desarrollada durante la fase de propulsión es similar para las dos condiciones de salto. Estos resultados confirman los datos aportados por Harman et al. (1990), Feltner et al. (2004) y Lees et al. (2004), aunque el valor medio registrado en este estudio para la altura de salto ha sido inferior al aportado en las citadas investigaciones. Posiblemente estas discrepancias se deban al nivel de experiencia de los grupos analizados y a la exigencia de mantener el tronco erguido durante la realización de los saltos CMJ, mientras que esta restricción no ha existido en los estudios citados.

Del análisis detallado del registro de la fuerza vertical con respecto al tiempo, para los saltos CMJ+b, se observan dos prominencias y un cierto valle entre ellas (ver figura 2 y tabla 2). La primera prominencia se sitúa en el periodo de final de la fase de contramovimiento, cercana al instante donde se produce la mínima distancia radial (t_{0v}) y la segunda prominencia se sitúa en el periodo final de la fase de propulsión, mientras que el valle comprende el periodo inicial de la fase de propulsión, cercano a t_1 . Estos datos coinciden con los aportados en otras investigaciones (Fukashiro and Komi, 1987; Bobbert and van Ingen Schenau, 1988; Harman et al. 1990), aunque existen ciertas controversias con las aportaciones de Feltner et al. (2004) al poner de manifiesto que la fuerza se reduce a lo largo de la fase de propulsión (a partir de la primera prominencia).

Observando las diferencias existentes entre las velocidades del CM y la cadera ($v_{(z)}_{CM}$ y $v_{(z)}_{CADERA}$), respectivamente), se pone de manifiesto que durante el periodo donde se produce la primera prominencia, la velocidad vertical de la cadera es inferior a la registrada por el CM, lo que implica que haya existido una cierta contribución vertical de los segmentos superiores. Según los datos relativos a los factores de contribución angular ($FCA_{(z)}$), para este periodo, se observa un incremento de la velocidad vertical del CM, con respecto al registrado por la cadera, lo que necesariamente tendrá su origen en la contribución del tronco ($FCA_{(z)}_{TRONCO}$), ya que los brazos mantienen una contribución negativa durante ese mismo periodo. Según lo expuesto, esta primera prominencia de la curva $F_{(z)}$ -tiempo, podría verse favorecida por la aceleración vertical del tronco y la cabeza, mientras que los brazos actuarían restando cierta contribución segmentaria. Considerando que la suma del tronco y la cabeza constituyen el 50.3% de la masa del sujeto (Zatsiorsky & Seluyanov, 1983), este hecho sería la consecuencia de una fuerza comprensiva resultante que surge hacia abajo y que produciría dos efectos: a) incremento de la velocidad de estiramiento de la musculatura extensora de los miembros inferiores, lo que produciría un incremento de la tensión muscular excéntrica (Komi, 1984; Dapena & Chung, 1988) y b) aumenta la fuerza vertical resultante que el suelo ejerce contra el saltador, lo que se evidencia mediante esta primera prominencia.

El valle, situado en el periodo inicial de la fase de propulsión, cercano a t_1 , podría tener su origen en una reducción de la contribución segmentaria. Así, durante este periodo, la contribución del tronco se reduce y los brazos aún mantienen una cierta contribución negativa, por lo tanto, la fuerza comprensiva se reduce y surge el valle descrito para la curva $F_{(z)}$ -tiempo. Como se ha indicado, existe una segunda prominencia situada en el periodo final de la fase de propulsión, cercana a t_2 . En este instante se produce la mayor diferencia entre las medias de las velocidades verticales del CM y la cadera (0.43 ms^{-1}), lo que nos permite pensar que haya existido

una importante contribución segmentaria. Los datos confirman este hecho, al ponerse de manifiesto que el factor medio de contribución angular de los brazos alcanza su máximo registro durante este periodo (14.13 ± 0.13) y el tronco sigue manteniendo una cierta contribución positiva (0.79 ± 0.32). En este caso, la contribución segmentaria, además de incrementar la fuerza vertical resultante que el suelo ejerce contra el saltador, la fuerza comprensiva que surge debida a la aceleración vertical de estos segmentos, produciría una cierta reducción de la velocidad de contracción de la musculatura extensora y, consecuentemente, un incremento de su tensión durante su actividad concéntrica (Hill, 1922; Komi, 1984; Dapena & Chung, 1988; Donaire & Challis, 2010).

Durante el periodo final de la fase de propulsión, cercano a t_{MV} y la fase previa al despegue, las velocidades verticales del CM y la cadera, tienden a igualarse (ver tabla 2 y figura 2). Este hecho se puede atribuir a una escasa participación del tronco y brazos, pero también a lo que Lees et al. (2004) han denominado como la teoría del «tirón». Efectivamente, aunque el registro medio de $F_{CA(Z)}$ de los brazos tiende a reducirse, la componente vertical de su velocidad tangencial es mayor que la del resto del cuerpo, por lo tanto, al reducir su velocidad vertical, contribuirá al incremento de la velocidad vertical del resto del cuerpo.

Según los datos expuestos, no podemos rechazar la teoría sobre la transmisión de fuerzas, como proponen Lees et al. (2004), ya que la fuerza vertical de reacción del suelo ($F_{(Z)}$) se incrementa cuando se aceleran verticalmente los segmentos, aunque el escaso desplazamiento vertical de la cadera ($S_{(Z) \text{ CADERA}}$) ratifica la teoría de que las fuerzas comprensivas podrían provocar una cierta acumulación de energía en la participación de la musculatura extensora de los miembros inferiores, que podría ser reutilizada en fases posteriores. Un aspecto que también sugieren Feltner et al. (2004).

Un factor de especial relevancia para el rendimiento del salto vertical, lo constituye la secuencia temporal de participación segmentaria. Según los datos expuestos en la tabla 2, sobre el factor de contribución angular al desplazamiento vertical ($F_{CA(Z)}$), el tronco alcanza su máximo valor antes de iniciarse la fase de propulsión (t_{0V}), a continuación, antes de iniciarse el periodo final de la fase de propulsión (t_2), son los brazos y el muslo los segmentos que alcanzan sus máximos valores y, finalmente, las piernas y los pies alcanzan sus máximas contribuciones, al final de la fase de propulsión y durante la fase previa al despegue.

Con respecto a la identificación de los cambios que se producen en el análisis cuando el salto se realiza restringiendo la participación segmentaria según el protocolo propuesto en el test de Bosco CMJ, se puede observar como las gráficas correspondientes curvas de $F_{(Z)}$ -tiempo, son diferentes para los dos tipos de salto (ver

figura 3). En general, se puede observar como desaparece la primera prominencia y el tiempo se incrementa cuando el salto se realiza sin restricción segmentaria (CMJ+b). Según las consideraciones expuestas sobre la relación entre la primera prominencia de la curva $F(z)$ -tiempo y la contribución del tronco, la reducción de la fuerza de reacción vertical constituye un efecto esperado, al verse restringida la contribución del tronco. Efectivamente, los datos expuesto en la tabla 2 ponen de manifiesto que, para los saltos CMJ, el factor angular de contribución del tronco ($FCA_{(z)}$ TRONCO) en t_{0v} es negativo, mientras que para los saltos CMJ+b, el $FCA_{(z)}$ TRONCO alcanza su valor positivo máximo (-0.73 ± 0.81 y 1.29 ± 0.51 , para CMJ y CMJ+b, respectivamente). Las reducidas diferencias entre las medias de los desplazamientos verticales del CM y la cadera ($S_{(z)CM}$ y $S_{(z)CADERA}$, respectivamente) para los saltos CMJ, durante el periodo final de la fase de contramovimiento (-0.02 m) y el periodo inicial de la fase propulsiva (0.01 m), confirman la escasa participación del tronco en este tipo de saltos (ver tabla 3) y justifica la no existencia de la primera prominencia.

Con respecto a las diferencias en el tiempo utilizado para el salto, no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas para el periodo final de la fase de contramovimiento (ver tabla 1). Sin embargo, el tiempo de propulsión es mayor cuando el salto se realiza sin restricción segmentaria ($p < 0.01$). Este hecho podría deberse a las diferencias en la distancia de aceleración vertical del CM y al efecto de la contribución del tronco durante el periodo inicial de la fase de aceleración. Con respecto a la distancia de aceleración, los datos ponen de manifiesto que el desplazamiento vertical del CM es mayor cuando los saltos se realizan sin restricción segmentaria (CMJ+b), situándose más bajo en t_{0v} y más alto en el despegue (ver tabla 1). Analizando detenidamente la distancia de aceleración vertical ($S_{(z)CM}$) para los tres periodos que determinan la fase de propulsión (ver tabla 3), se observa como las diferencias estadísticas entre las medias existen para los periodos medio ($p < 0.01$) y final, donde la contribución de los brazos comienza a ser positiva ($p < 0.001$). Con respecto a la posible segunda causa del incremento temporal registrado para los saltos CMJ+b, los datos expuestos en la tabla 3 para el periodo inicial de la fase propulsiva, ponen de manifiesto que el valor medio de $FCA_{(z)}$ del tronco es significativamente mayor para los saltos CMJ+b, mientras que los $FCA_{(z)}$ del muslo y la piernas son significativamente más reducidas ($p < 0.05$ y 0.001 , respectivamente; tabla 3), manteniéndose aún negativo el factor de contribución angular de la pierna. Así, en los salto con restricción segmentaria (CMJ), la escasa contribución del tronco, reduciría la producción de fuerzas comprensivas hacia abajo y favorecería el inicio de la actividad la extensión de los miembros inferiores, mientras que en los salto CMJ+b se retrasaría hasta el siguiente periodo.

Del análisis comparado entre los dos tipos de salto, se pone de manifiesto que la restricción segmentaria propuesta en el protocolo de Bosco CMJ, modifica la secuencia temporal de participación segmentaria durante la fase de propulsión, reduce las fuerzas verticales de reacción durante el periodo inicial de la fase propulsiva y modifica las características mecánicas de participación muscular. Según lo expuesto, es necesario ser cautos al intentar relacionar el rendimiento del salto vertical a partir de los datos obtenidos mediante las restricciones propuestas en el test de Bosco CMJ.

REFERENCIAS

- Aragón-Vargas, L. F. (2000). Evaluation of four vertical jump tests: Methodology, reliability, validity and accuracy. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 4, 215-228.
- Cromer, A.H. (1985). *Física par las ciencias de la vida*. Barcelona, Reverté.130-134.
- Dapena, J. and Chung, C.S. (1988). Vertical and radial motions of the body during the take-off phase of high jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 20(3), 290-302.
- Domire, Z.J. and Challis, J.H.(2010) 'An induced energy analysis to determine the mechanism for performance enhancement as a result of arm swing during jumping', *Sports Biomechanics*, 9(1), 38-46.
- Feltner, M.E., Frascchetti, D.J., Crisp, R.J. (1999). Upper extremity augmentation of lower extremity kinetics during countermovement vertical jumps. *Journal of Sports Sciences*, 17, 449-466.
- Feltner, M.E., Bishop, E.J. and Perez, C.M. (2004). Segmental and kinetic contributions in vertical jumps performed with and without an arm swing. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 75(3), 216-230.
- Gutiérrez-Dávila, M., Dapena, J. and Campos, J. (2006). The effect of muscular pre-tensing on the sprint start. *Journal of Applied Biomechanics*, 22(3), 194-201.
- Harman, E.A., Rosenstein, M.T., Frykman, P.N. and Rosenstein, R.M., 1990. The effects of arms and countermovement on vertical jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22, 825-833.
- Hill, A.V. (1922). The maximum work and mechanical efficiency of human muscles, and their most economical speed. *Journal of physiology*, 56: 19-41
- Komi, P. V. (1984). Physiological and biomechanical correlates of muscle function: Effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed. *Exercise and sport sciences reviews*, 12, 81-121
- Lees, A., Vanrenterghem, J. and Clerc, D. (2004). Understanding how an arm swing enhances performance in the vertical jump. *Journal of Biomechanics*, 37, 1929-1940.
- Leva, De, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanovs segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*. 29(9), 1223-1230.
- Luhtanen, P. and Komi, R.V. (1978). Segmental contribution to forces in vertical jump. *European Journal of Applied Physiology*. 38, 181-188.

- Miller D.L. and East, D.J. (1976). *Kinematic and kinetic correlates of vertical jumping in woman*. In: Biomechanics V-B. (Ed: Komi, P.V.) 65-72. Baltimore: University Park Press.
- Payne, A.H.; Slater, W.J. and Telford, T. (1968). Use of force platform in the study of athletic activities. *Ergonomics*, 11, 123-146.
- Tidow, G. (1990). Aspects of strength training in athletics. *New Studies in Athletics*, 1, 93-110.
- Zatsiorsky, V.M. and Seluyanov, N.V. (1983). *The mass and inertial characteristics of the main segments of the human body*. In: Biomechanics VIII-B. Matsui, H. and K. Kobayashi (Eds) Champaign, IL: Human Kinetics, 1152-1159.
- Wood, G.A. and Jennings, L.S. (1979). On the use of spline functions for data smoothing. *Journal of Biomechanics*, 12, 477-479.