

Análisis biomecánico de la técnica individual de los finalistas masculinos del lanzamiento de peso en el Campeonato del Mundo de Atletismo Valencia 08

F. J. ROJAS¹, M. GUTIÉRREZ-DÁVILA¹, J. CAMPOS², J. GÁMEZ³, A. ENCARNACIÓN³.

¹ Departamento de Educación Física y Deportiva. Universidad de Granada

² Departamento de Educación Física y Deportiva. Universidad de Valencia

³ Instituto Biomecánico de Valencia

Resumen

El objetivo de este estudio ha sido realizar un análisis descriptivo de la técnica individual de los ocho finalistas masculinos de lanzamiento de peso en el Campeonato del Mundo de Atletismo de Pista Cubierta, celebrado en Valencia, 2008. Para este estudio, se han utilizado técnicas fotogramétricas tridimensionales (3D) a partir de la filmación del gesto con dos cámaras de video sincronizadas temporalmente a 100 Hz, analizándose el mejor lanzamiento de cada atleta. Se parte de un análisis temporal, donde se ha dividido el gesto en seis fases. A partir de esas fases, se describen las gráficas de velocidad tangencial del CG y el peso con respecto al tiempo. A continuación, se registraron los factores que determinan la trayectoria del peso durante el vuelo (factores de producto), así como el compromiso de otros factores causales que determinan la eficacia del lanzamiento de peso. Además de confirmar la relación entre los factores de producto, los resultados ponen de manifiesto que cada lanzador utiliza una secuencia temporal y ritmo de ejecución propio e individual, confirmándose que la ejecución técnica del lanzamiento de peso es individual y está condicionada por características antropométricas, capacidad muscular y el grado de automatización de la secuencia temporal individual.

Palabras Clave: Atletismo, Lanzamiento de peso, biomecánica, análisis cinemático tridimensional.

Abstract

The aim of this study is to make a descriptive analysis of the individual technique of the eight men finalists in the shot put in the 2008 Valencia Indoor World Championships. To do this three-dimensional photogrammetric techniques (3D) were used, filming the action with two video cameras temporally synchronized at 100 Hz. Six puts were recorded during the men's final, subsequently analysing the longest throw of each putter. A temporal analysis was first made, dividing the throwing action into six phases. Starting from these phases, graphs of the tangential velocity of the thrower's CG and the time taken in the shot are described. Then the factors that determine the trajectory of the shot during flight (product factors) and the contribution of the other causal factors for the efficiency of the put are recorded. As well as confirming the relation between the product factors, the results show that each thrower uses his/her own temporal sequence and rhythm of execution, confirming that the technical execution of the shot put is individual and conditioned by anthropometrical characteristics, muscular capacity and the degree of automation of the individual temporal sequence.

Keywords: Athletics, Biomechanics, Shot put, Analysis 3D.

Introducción

El lanzamiento de peso constituye una prueba atlética que implica la realización de unos movimientos complejos, realizados a una velocidad relativamente alta y en un espacio limitado (Luhtanen, Blomquist and Vanttinen, 1997). El lanzador inicia el movimiento con un desplazamiento previo en un espacio muy reducido, pudiendo utilizar para ello dos técnicas diferentes: la convencional, denominada también de deslizamiento y la técnica de rotación. Tras el desplazamiento previo se realiza un movimiento final o de aceleración, donde es necesario desarrollar una gran fuerza contra el peso durante un periodo de tiempo muy reducido.

Según la técnica utilizada, el desplazamiento previo puede analizarse mediante cuatro o cinco fases temporales (convencional o rotacional, respectivamente). Aunque la diferencia en el desplazamiento previo es evidente para las dos técnicas, el movimiento final es muy similar. Durante este movimiento final, el lanzador debe ejercer fuerza contra el peso mediante una secuencia temporal de participación segmentaria que comienza con una extensión rápida de las piernas, acompañada de una extensión y rotación del tronco y seguida de una rápida extensión del brazo hacia la dirección de lanzamiento (Linthorne, 2001). Luhtanen et al. (1997) consideran que el cambio de velocidad que se produce durante el apoyo doble es el factor más determinante para la distancia de lanzamiento y que una fase crítica podría ser la de vuelo, donde la velocidad del CG está en su punto más bajo.

Tras el despegue del peso de la mano del lanzador, éste se comporta como un proyectil en fase aérea, por lo que su trayectoria estará determinada por tres factores de producto: a) la velocidad tangencial, b) la altura de despegue y c) el ángulo de lanzamiento. Además de estos tres factores es necesario considerar la distancia horizontal de despegue del peso con respecto a la medición en círculo de lanzamiento.

Según las aportaciones de Bartonietz (1994), Luhtanen et al (1997), Lanka, 2000 y Zatsiorsky

(1990), la velocidad tangencial de despegue constituye el factor más determinante para el alcance de lanzamiento. La altura de despegue está condicionada por los parámetros antropométricos del lanzador, la posición del CG en el instante de despegue, el ángulo del brazo con respecto a la horizontal y la técnica utilizada en el movimiento final de aceleración (Coh, Supej, and Stuhec, 2007). El ángulo de lanzamiento es el factor de producto que más controversia ha motivado entre los investigadores. Desde una perspectiva teórica, Lichtengerg and Wills (1978) determinaron que el ángulo óptimo de lanzamiento debería ser alrededor de 42° para lanzamientos de élite mundial. Sin embargo, los ángulos de lanzamiento alcanzados por la mayoría de los lanzadores de élite han sido inferiores a 42°, variando entre 26° y 45°, con un valor medio de 37° (Bartonietz and Borgström, 1995; Tsirakoss et al., 1995; Luhtanen et al, 1997). Las diferencias obtenidas entre la medida teórica y la real se ha explicado por la dependencia que debe de existir entre las tres variables y considerar un error el uso independiente de las variables, como consideró Lichtengerg and Wills (1978) en su estudio.

Zatsiorsky (1990) y Linthorne (2001) han explicado la dependencia entre los factores de producto a partir de la estructura y contribución muscular en el movimiento final del lanzamiento, además de la acción de la gravedad. De forma experimental, Hubbard, Mestre and Scott, (2001) han puesto de manifiesto que la velocidad tangencial en el despegue disminuye al aumentar el ángulo de lanzamiento en alrededor de 1.7(m/s)/rad. En este mismo estudio, también se ha comprobado como la velocidad tangencial disminuye al aumentar la altura de despegue en alrededor de 0.8(m/s)/m, lo que confirma lo expuesto en estudios precedentes sobre la relación que existe entre las variables de producto.

Además, se han considerado otros factores de proceso. Coh, Supej, and Stuhec (2007) han considerado relevantes las características antropométricas, la talla, la masa, o el índice de masa corporal, entre otras. Desde una visión más cinemática, Coh and Stuhec (2005), aportan como relevantes la distancia de aplicación de fuerzas durante el movimiento final, la variación del ángulo que forman los ejes de las caderas con respecto a eje de los hombros (ángulo de torsión del tronco) y las velocidades angulares de las articulaciones del codo y del hombro.

La variabilidad experimentada en los datos que aportan las investigaciones descriptivas nos hacen

Correspondencia:

F. Javier Rojas Ruiz
Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte
Departamento de Educación Física.
Ctra. Alfacar s/n 18011- Granada, (España)
Telf. 958244387
Fax: 958244369
E-mail: fjrojas@ugr.es

pensar en la existencia de una técnica individual muy alejada de cualquier patrón ideal común. Por ello, partiendo de esta concepción individual de la técnica, el objetivo de este estudio es realizar un análisis descriptivo de la técnica individual de los ocho finalistas masculinos de lanzamiento de peso en el Campeonato del Mundo de Atletismo de Pista Cubierta, celebrado en Valencia, 2008.

Métodos

Se han analizado a los finalistas del lanzamiento de peso durante su participación en la final del Campeonato del Mundo de Atletismo de Pista Cubierta, Valencia 08. En la Tabla 1 se presentan los lanzadores analizados junto a ciertos datos antropométricos relevantes como talla y peso, la técnica utilizada, la mejor marca obtenida en el campeonato y analizada en este estudio (Val08-Result), y mejor marca de la temporada (Season 07-08).

Para este estudio, se han utilizado técnicas fotogramétricas tridimensionales (3D) a partir de la filmación del gesto con dos cámaras de video a 100 Hz y sincronizadas temporalmente mediante un sistema Gen-lock. Como sistema de referencias se ha utilizado un cubo con doce puntos distribuidos proporcionalmente en el espacio de lanzamiento. Después de obtener las coordenadas planas de los 21 puntos que determinan los catorce segmentos del cuerpo más el que corresponde al centro del

peso, se realizó un ajuste de dichas coordenadas mediante splines de quinto grado (Word & Jennings, 1979). Finalmente, se utilizaron las técnicas de DLT, desarrolladas por Abdel-Asiz and Karara (1971), para obtener las coordenadas espaciales con respecto a un sistema de referencia donde el eje Z es el vertical, el Y es el horizontal con sentido a la dirección teórica de lanzamiento y coincidente con la bisectriz del ángulo de lanzamiento y X es perpendicular a los otros dos (Figura 1).

Siguiendo a Goss-Sampson and Chapman (2003), para el análisis temporal de los lanzamientos de peso realizados con técnica giratoria se han considerado seis fases (Figura 2).

Resultados

En la tabla 2 se presentan los tiempos correspondientes a las fases en que se ha dividido el lanzamiento. Se observa como el tiempo utilizado en la primera fase de apoyo simple es similar para todos los lanzadores, por el contrario, para las dos siguientes fases existe una cierta variabilidad temporal entre los lanzadores.

Aunque la secuencia temporal de ejecución de las fases es diferente para cada lanzador, las gráficas de las velocidades tangenciales del peso y del CG de los lanzadores con respecto al tiempo reflejan una cierta tendencia general en el ritmo de ejecución de las fases. Para la técnica de rotación, durante la primera fase de apoyo único, la velocidad

Atleta	País	Técnica	Altura (m)	Masa (Kg)	Val08-Result (m)	Season 07-08 (m)
Cantwell	USA	Rotación	1.98	145	21.77	22.18
Hoffa	USA	Rotación	1.83	118	21.20	21.40
Majewski	POL	Tradicional	2.04	132	20.93	20.51
Mikhnevich	BLR	Tradicional	2.02	115	20.82	20.77
Smith	NED	Rotación	1.97	125	20.78	20.89
Scott	JAM	Rotación	1.85	105	20.29	20.36
Martin	AUS	Rotación	1.90	130	20.13	20.13
Sack	GER	Rotación	1.90	120	20.05	20.88

Tabla 1. Lanzadores analizados en este estudio, donde Val08-Result corresponde a la mejor marca obtenida y analizada en el Campeonato del Mundo de Pista cubierta Valencia-08 y Season 07-08 es la mejor marca conseguida en la temporada 07-08.

tangencial del peso es superior a la del CG del lanzador, mientras que durante la primera fase de vuelo y segunda fase de apoyo único, esta situación de invierte, es decir, la velocidad tangencial del peso se sitúa por debajo de registrada por el CG del lanzador. Para la técnica tradicional, la velocidad tangencial del peso se mantiene al mismo nivel que la del CG del lanzador durante las tres primeras fases. Finalmente, durante el movimiento de empuje

final se produce el incremento definitivo de la velocidad tangencial del peso hasta el despegue.

En general, se puede afirmar que el análisis de la ejecución técnica individual y, concretamente, la distancia de lanzamiento, está muy condicionada por el movimiento de empuje final. En teoría, este instante debería de coincidir con el inicio del incremento de la velocidad tangencial del peso, como ocurre en los lanzamientos analizados de



Figura 1. Sistema de referencias de 12 puntos y cámaras de alta velocidad 100 HZ utilizadas.

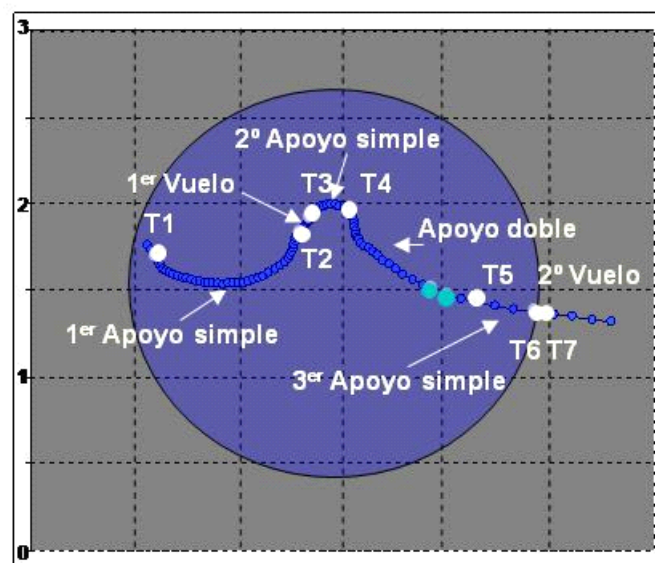


Figura 2. Representación gráfica sobre el círculo de lanzamiento de las fases temporales del lanzamiento de peso.

Cantwell y Hoffa . En el caso de Scott, el contacto del pie izquierdo (T4) se realiza antes de que comience la aceleración final del peso, lo que provoca que el movimiento de empuje final sea excesivamente largo (0.28 s). Todo lo contrario ocurre con el lanzamiento analizado de Martin, donde el pie izquierdo toma contacto con el suelo (T4) cuando ya ha comenzado un cierto incremento de velocidad tangencial del peso, lo que provoca que el movimiento final de empuje al peso se reduzca excesivamente (0.18 s), Figura 3.

En la tabla 3 se presentan los factores de producto obtenidos en los lanzamientos analizados. Como cabría esperar, la mayor velocidad tangencial del peso en el despegue ($v_{t(RELEASE)}$) se consigue en los lanzamientos de mayor alcance. Para hombres, Cantwell es el que consigue mayor velocidad (14.13 ms^{-1}) mientras que su ángulo de lanzamiento ($\theta_{(RELEASE)}$) es el uno de los más reducidos (35°), manteniendo una distancia horizontal de despegue del peso ($D_{(RELEASE)}$) relativamente alta (0.10 m). Una relación similar entre estos tres factores consigue Hoffa (13.99 ms^{-1} , 34° y 0.20 m). Todo lo contrario ocurre con el lanzamiento analizado de Martin, donde la velocidad de salida del peso es de las más reducidas para hombres (13.38 ms^{-1}), un ángulo de lanzamiento de los más elevados (39°) y una distancia horizontal de despegue muy reducida (0.03 m).

Según los datos generales expuestos en la tabla 3 (N=16), se pone de manifiesto que cuando el

ángulo de lanzamiento ($\theta_{(RELEASE)}$) tiende a ser mayor, la distancia horizontal de despegue del peso ($D_{(RELEASE)}$) tiende a reducirse, con un coeficiente de correlación de $R = -0.73$ ($p < 0.005$), manteniéndose esta correlación cuando se utilizan los datos de la distancia de lanzamiento referidos al porcentaje de la talla. Estos datos también ponen de manifiesto que cuando se obtienen velocidades tangenciales ($v_{t(RELEASE)}$) más altas del peso en el despegue, los ángulos obtenidos ($\theta_{(RELEASE)}$) tienden a ser más reducidos, con un coeficiente de correlación de $R = -0.55$ ($p < 0.05$).

Con respecto a la altura de despegue del peso ($H_{(RELEASE)}$) se confirma la relación que tiene este factor con la talla ($R = 0.86$; $p < 0.001$). Por el contrario, cuando este factor se expresa en porcentajes de la talla, no se ha correlacionado con la velocidad tangencial del peso en la suelta ($v_{t(RELEASE)}$) ni con el ángulo de despegue del peso ($\theta_{(RELEASE)}$). Así, Majewski, con una talla de 2.04 m, es el lanzador que consigue más altura del peso en el despegue (2.29 m), aunque cuando se expresa este factor en función del porcentaje de la talla es Scott el que consigue mayor porcentaje (116.2%), coincidiendo con el mayor ángulo de salida (41°) y el hecho de realizar la última fase del movimiento final en salto. Cantwell registra el valor más bajo de $H_{(RELEASE)}$ cuando se expresa en porcentaje de su talla (106%), manteniendo un ángulo de salida relativamente bajo y realizar el la última fase del movimiento final en apoyo.

Atleta	Primer apoyo simple (s)	Primer vuelo (s)	Segundo apoyo simple (s)	Doble apoyo (s)	Tercer apoyo simple (s)	Segundo vuelo (s)
Cantwell	0.48	0.03	0.21	0.18	0.03	0.00
Hoffa	0.44	0.04	0.21	0.19	0.00	0.04
Majewski	0.41	0.10	0.11	0.17	0.04	0.03
Mikhnevich	0.44	0.11	0.05	0.20	0.03	0.03
Smith	0.45	0.06	0.25	0.16	0.03	0.02
Scott	0.41	0.05	0.18	0.20	0.01	0.07
Martin	0.44	0.12	0.17	0.16	0.00	0.02
Sack	0.49	0.08	0.21	0.16	0.02	0.02

Tabla 2. Estudio temporal de los lanzamientos analizados.

En la Tabla 4 se presentan variables cinemáticas que podrían relacionarse con la eficacia en la aplicación de fuerzas durante el movimiento final. Con respecto a la velocidad tangencial del peso en el instante T4 ($v_{t(TIME-T4)}$), no parece que sea un factor que, por sí solo, condicione la velocidad final del peso. En este

sentido, los valores más reducidos los obtienen Cantwell y Hoffa (1.18 ms^{-1} y 1.11 ms^{-1} , respectivamente), siendo los que alcanzan mayores velocidades tangenciales en el despegue del peso. En general esta distancia tiene una relación directa con la talla de los lanzadores ($R=0.63$; $p<0.01$).

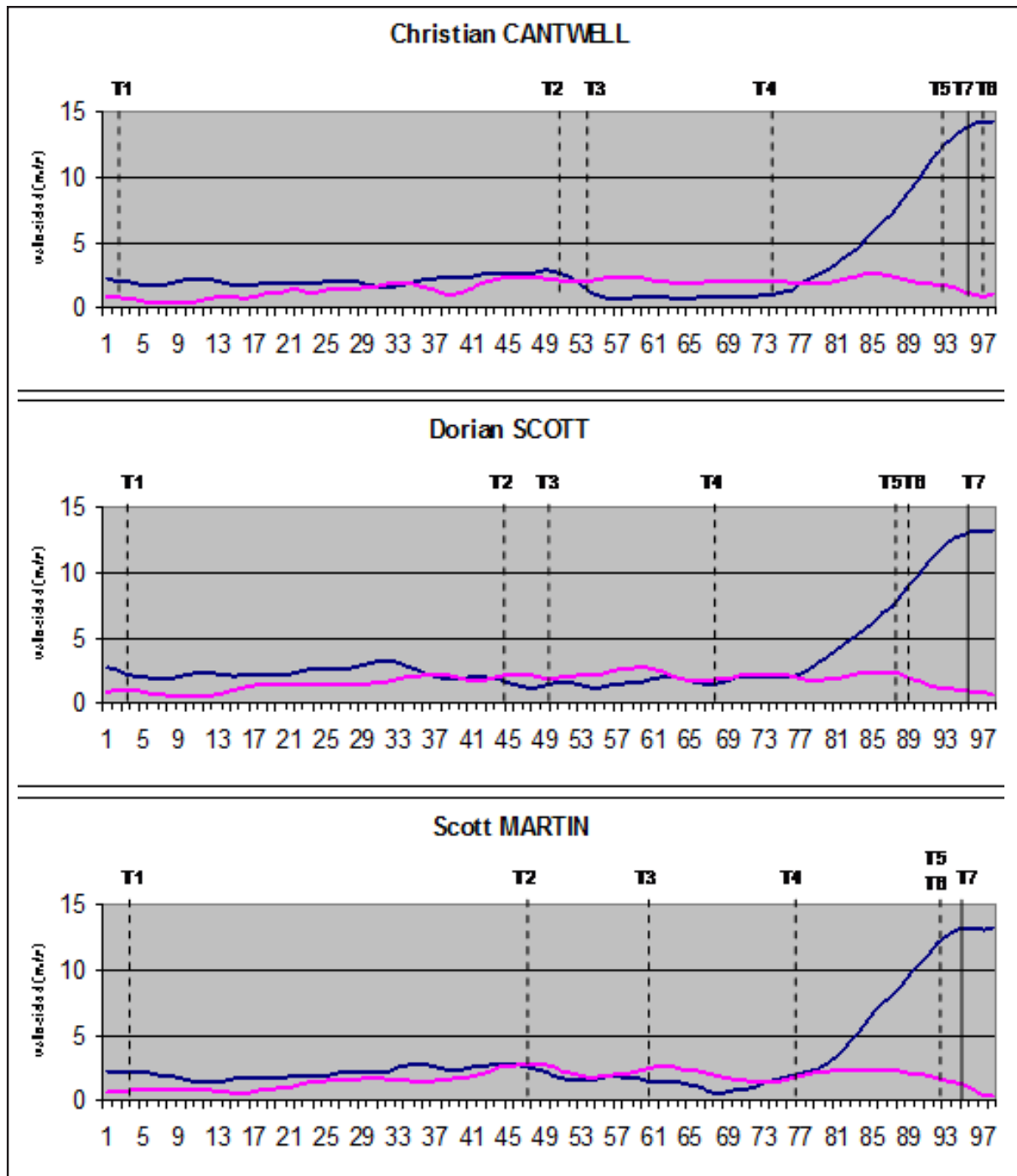


Figura 3. Representación gráfica de las evoluciones de las velocidades del peso y CG de los tres primeros clasificados.

Atleta	$V_{t(RELEASE)}$ (ms^{-1})	$H_{(RELEASE)}$ (m) (%)	$\theta_{(RELEASE)}$ ($^{\circ}$)	$D_{(RELEASE)}$ (m) (%)
Cantwell	14.13	2.10 106.0	35	0.10 5.0
Hoffa	13.99	2.08 113.7	34	0.20 10.9
Majewski	13.63	2.29 112.3	37	0.15 7.4
Mikhnevich	13.58	2.25 111.4	39	0.07 3.5
Smith	13.61	2.21 112.2	37	0.15 7.6
Scott	13.39	2.15 116.2	41	0.08 4.3
Martin	13.38	2.12 111.6	39	0.03 1.6
Sack	13.38	2.16 113.4	37	0.07 3.7

Tabla 3. Factores de producto de los lanzamientos analizados

Atleta	$V_{t(TIME-T4)}$ (ms^{-1})	$D_{(TIME T4-T7)}$ (m) (%)	$a_{m(TIME T7-T4)}$ (ms^{-2})	$H_{CG(TIME T4)}$ (m) (%)	$H_{PUT(TIME T4)}$ (m) (%)
Cantwell	1.18	1.51 76.3	61.66	0.96 48.5	1.39 70.2
Hoffa	1.11	1.60 87.4	56.00	0.91 49.7	1.24 67.8
Majewski	3.22	1.84 90.2	43.37	0.95 46.6	1.26 61.8
Mikhnevich	2.26	1.79 88.6	43.54	0.95 47.0	1.27 62.9
Smith	2.49	1.59 80.7	52.95	0.95 48.2	1.26 64.0
Scott	1.57	1.69 91.4	42.21	0.86 46.5	1.22 65.9
Martin	2.04	1.41 74.2	63.00	0.96 50.5	1.36 71.5
Sack	2.13	1.45 73.3	56.25	0.96 50.5	1.31 68.9

Tabla 4. Factores cinemáticos de los lanzamientos analizados.

En la tabla 5 se presentan los datos referidos a la posición de los ejes de las caderas y de los hombros con respecto a la bisectriz del ángulo de lanzamiento ($\theta_{(HIPS\ T4)}$ y $\theta_{(SHOULDERS\ T4)}$, respectivamente). La diferencia de estos ángulos nos proporciona el ángulo de torsión del tronco. Para hombres los dos lanzadores que utilizan la técnica tradicional (Majewski y Mikhnevich) son los que consiguen los ángulos de torsión más elevados (75° y 61°, respectivamente), lo que consiguen gracias a una excesiva rotación del eje de las caderas ($\theta_{(HIPS\ T4)}$). En los dos casos, el eje de las caderas alcanzan valores negativos (-9 y -11, respectivamente), lo que supone que el eje de las caderas esté orientado hacia la dirección de lanzamiento.

Finalmente, en la tabla 6 se presentan las posiciones de los ejes de las caderas y de los hombros en el instante de la suelta ($\theta_{(HIPS\ T7)}$ y $\theta_{(SHOULDERS\ T7)}$, respectivamente), así como las velocidades angulares respectivas ($\omega_{(HIPS\ T4)}$ y

$\omega_{(SHOULDERS\ T4)}$, respectivamente). Scott se destaca con un ángulo negativo del eje de las caderas excesivamente alto (-104°), lo que nos indica que en el instante de la suelta, el eje de las caderas no ha alcanzado la perpendicular a la bisectriz del ángulo de lanzamiento (90°), posiblemente dificultado por el ángulo negativo que obtiene en el apoyo de pies durante la fase de doble apoyo ($\theta_{(SUPPORT)}$). Esta misma razón podría ser la causante de que el ángulo del eje de los hombros alcance valores negativos excesivamente altos (-84°).

Discusión y Conclusiones

La secuencia de participación segmentaria que se produce en el movimiento de empuje final comienza con una extensión rápida de piernas acompañada de la extensión y rotación del tronco y seguida de una rápida extensión del brazo hacia la dirección del lanzamiento (Linthorne, 2001). Esta

Atleta	$\theta_{(HIP\ T4)}$ (°)	$\omega_{(HIPS\ T4)}$ (rads ⁻¹)	$\theta_{(SHOULDERS\ T4)}$ (°)	$\omega_{(SHOULDERS\ T4)}$ (rads ⁻¹)	$\theta_{(SUPPORT)}$ (°)
Cantwell	36	1.03	70	13.68	17
Hoffa	32	7.74	87	17.37	19
Majewski	-9	0.27	66	7.28	27
Mikhnevich	-11	4.42	50	3.15	18
Smith	32	8.99	61	6.01	13
Scout	48	6.16	115	9.13	-21
Martin	15	11.57	53	11.83	15
Sack	16	16.45	47	7.54	41

Tabla 5. Factores cinemáticos para la descripción del instante en que se inicia la fase de doble apoyo (T4).

secuencia de movimiento debe dar como resultado un gran cambio de velocidad del peso desde el inicio de la fase de doble apoyo (T4) hasta la suelta (t_7), siendo éste el determinante más importante para el resultado del lanzamiento (Luhtanen et al., 1997). Según los datos expuestos en las figuras 4 y 5, en los lanzamientos analizados con técnica giratoria, los lanzadores Cantwell, Hoffa, Smith, y Sack consiguen ese gran cambio de velocidad (aceleración) desde el instante T4. Por el contrario, en los lanzamientos analizados de Majewski y Mikhnevich (técnica tradicional), la aceleración definitiva del peso se inicia algo más tarde de tomar contacto el pie izquierdo con el suelo (T4).

Un caso excepcional y que nos permite explicar la posible relación entre los factores indicados es

el lanzamiento analizado de Scott. A pesar de utilizar la técnica giratoria, durante los primeros instantes de la fase de apoyo doble no se produce el incremento esperado en la velocidad tangencial del peso. Este hecho ocurre al llegar al inicio de la fase de apoyo doble (T4) en una posición que no propicia el comienzo de la secuencia temporal de participación segmentaria para el movimiento de empuje final. Aunque obtiene un valor de torsión del tronco relativamente alto (67°), este valor lo consigue al apoyar el pie izquierdo en el suelo de forma precipitada. Esta precipitación provoca que el ángulo entre apoyos ($\theta_{(SUPPORT)}$) alcance valores negativos relativamente altos (-21°), lo que pone de manifiesto que, el apoyo del pie izquierdo no sobrepase el apoyo del pie derecho, lo que

Atleta	$\theta_{(HIPS T7)}$ ($^\circ$)	$\omega_{(HIPS T7)}$ ($rads^{-1}$)	$\theta_{(SHOULDERS T7)}$ ($^\circ$)	$\omega_{(SHOULDERS T7)}$ ($rads^{-1}$)
Cantwell	-82	13.50	-75	17.32
Hoffa	-74	12.71	-57	18.25
Majewski	-90	11.9	-72	10.11
Mikhnevich	-89	8.11	-74	10.92
Smith	-86	15.4	-63	15.05
Scott	-104	6.95	-84	7.74
Martin	-78	16.01	-66	16.05
Sack	-71	11.95	-63	16.86

Tabla 6. Factores para la descripción del instante del despegue del peso de la mano del lanzador.

provocará dificultades posteriores para orientar la cadera hacia la dirección de lanzamiento, como ponen de manifiesto los datos expresado en la tabla 6. La consecuencia es que el eje de las caderas esté demasiado girado en sentido contrario al lanzamiento en T4 (48°) y más aún el eje de los hombros (115°), lo que sitúa al lanzador en una posición que no le permite comenzar, en ese instante (T4), la secuencia de participación segmentaria del movimiento de empuje final. Con esta posición, el lanzador debe retrasar la extensión rápida de piernas y tronco que produce el incremento de velocidad tangencial del peso.

El ejemplo expuesto pone de manifiesto que, aunque cada lanzador utiliza una secuencia temporal propia y una relación entre factores única, existen límites en ciertos factores a partir de los cuales el lanzador puede tener problemas en su técnica. Algunos de los factores más críticos están relacionados con el instante en que se inicia este movimiento final (T4). Aunque los valores de estos factores críticos suelen estar condicionados por lo ocurrido durante las fases anteriores, es necesario significar su relevancia para la eficacia del movimiento final de aceleración y, consecuentemente, con la distancia de lanzamiento.

Con respecto a las variables de producto, se confirma que la velocidad tangencial de despegue del peso es el factor más determinante para el alcance de lanzamiento, como ponen de manifiesto Bartonietz (1994), Luhtanen et al (1997) y Lanka (2000). Igualmente, nuestros datos confirman una clara relación entre la altura de despegue del peso ($H_{(RELEASE)}$) y la talla de los lanzadores ($p < 0.001$), siendo los valores obtenidos similares a los aportados por Stepanek (1989), Luhtanen et al (1997) y Lanka, 2000 y Linthorne (2001) para lanzadores de élite. Por el contrario, no se ha podido confirmar que exista una correlación entre la altura de lanzamiento ($H_{(RELEASE)}$) y la velocidad tangencial en la suelta ($v_{t(RELEASE)}$), como ponen de manifiesto Hubbard, Mestre and Scott, (2001). Posiblemente esta discrepancia sea debida a la variabilidad existente entre los lanzadores analizados en este estudio. Los datos relativos al ángulo de salida del peso ($\theta_{(RELEASE)}$) mantienen valores similares a los obtenidos por Bartonietz and Borgström, (1995); Tsirakoss et al. (1995); Luhtanen et al (1997), confirmándose que cuando se incrementa el ángulo de salida, la velocidad tangencial del peso en la suelta ($v_{t(RELEASE)}$) tiende a ser más reducida ($p < 0.01$), como ponen de manifiesto Hubbard, Mestre and Scott, (2001).

La distancia horizontal de despegue del peso ($D_{(RELEASE)}$) obtenida en este estudio, varía entre los 0.20 m obtenidos en el lanzamiento analizado de Hoffa y los -0.05 obtenidos en el lanzamiento de Rosa. En general en nuestros datos se consigue una media algo inferior a los datos aportados por Coh and Stuhec (2005). Según los datos expuestos en la tabla 3, esta distancia tiende a reducirse cuando se incrementa el ángulo de salida del peso ($\theta_{(RELEASE)}$), con un coeficiente de correlación de $R = -0.73$ ($p < 0.001$). Según los resultados expuestos sobre las factores de producto (tabla 3), se puede afirmar que cuando el ángulo de salida del peso ($\theta_{(RELEASE)}$) tiende a reducirse, la velocidad tangencial del peso en la suelta ($v_{t(RELEASE)}$) y la distancia horizontal de despegue ($D_{(RELEASE)}$) se incrementan. Dos correlaciones que confirman la dependencia que existe entre los factores de producto, como ponen de manifiesto Zatsiorsky (1990) y Linthorne (2001), además de ser cautos con valores demasiado altos en el ángulo de salida del peso.

Otro de los factores que tradicionalmente se ha considerado relacionado con la velocidad tangencial del peso en la suelta es la distancia de empuje del peso en el movimiento final ($D_{(TIME T4-T7)}$). Según los datos expuestos en la tabla 4, no podemos confirmar esta relación. Considerando este factor desde una perspectiva exclusivamente matemática, podríamos afirmar que cuanto mayor sea la distancia de aceleración, mayor será la velocidad final. Pero esto ocurre siempre que la aceleración sea constante, algo que no sucede en todos los lanzamientos, por el contrario cada lanzador utiliza un tiempo de aceleración individual que, probablemente, esté relacionado con capacidad individual de aplicar fuerzas, factores derivados de la propia técnica y ciertos parámetros antropométricos. En este sentido, $D_{(TIME T4-T7)}$ se ha correlacionado con la talla ($p < 0.001$) y cuando los valores se expresan en porcentajes de la talla, la distancia de empuje de peso en el movimiento final tiende a incrementarse cuando la altura del peso en T4 ($H_{PUT(TIME T4)}$) tiende a reducirse ($P < 0.05$).

Finalmente, los datos confirman que cuando se incrementa la distancia de empuje del movimiento final ($D_{(TIME T4-T7)}$), la aceleración media ($a_{m(TIME T4-T7)}$) tiende a ser más reducida ($p < 0.01$), lo que nos permite pensar que, a medida que se reduce la distancia de aceleración (hasta ciertos valores mínimos), la fuerza aplicada contra el peso se incrementa. Este hecho estaría fundamentado en las teorías expuestas por Hochmuth (1967) sobre

la distancia de aceleración óptima para el salto vertical o las desarrolladas por Pierrine and Edgerton (1978) sobre la capacidad individual de la musculatura para desarrollar fuerza.

Nuestros datos no confirman que exista una correlación entre el ángulo de torsión del tronco en T4 y la distancia de lanzamiento, como ponen de manifiesto Goss-Sampson and Chapman (2003). Goss-Sampson and Chapman (2003) sugieren facilitar la rotación del eje de las caderas durante la fase de apoyo doble incrementando del ángulo de los apoyos ($\theta_{\text{(RELEASE)}}$). Esta sugerencia crea una cierta controversia entre los que consideran que la pierna izquierda debe bloquear la cadera antes del despegue. Con algunas excepciones, nuestros datos confirman que la pierna izquierda no provoca reducción de la velocidad angular del eje de las caderas. En este sentido, las velocidades angulares del eje de las caderas en el instante de la suelta ($\theta_{\text{(HIP T7)}}$) para la mayoría de los lanzamientos analizados supera los 9 rads^{-1} . Para los lanzamientos analizados con la técnica giratoria, sólo se obtiene un valor inferior en el lanzamiento de Scott (6.95 rads^{-1}), aunque debemos recordar que es el único lanzador que obtiene valores negativos en $\theta_{\text{(RELEASE)}}$, lo que dificulta la rotación de la cadera durante la fase de apoyo doble, como se ha comentado con anterioridad.

Bibliografía

1. **Abdel-Asiz, Y.J. and Karara, H. M.** Directer linear transformation from comparator coordinates into space coordinates in close-range photogrammetry. *A.S.P. Symposium on close-range photogrammetry*. American Society of Photogrammetry: Falls Church (1971).
2. **Bartonietz, K.** Rotational shot put technique: Biomechanics findings and recommendations for training. *Track an Field Quarterly Review*, 1994, 93(3):18-29.
3. **Bartonietz, K and Borgström, A.** The throwing events at the World Championships in Athletics 1995, Goteborg – Technique of the world's best athletes. Part 1: Shot put and hemmer throw. *New Studies in Athletics*, 1995, 10(4):43-63
4. **Coh, M. and Stuhec, S.** 3-D kinematic analysis of the rotational shot put technique. *New Studies in Athletics*, 2005, 20(3): 57-66
5. **Coh, M. Supej, M. and Stuhec, S.** Biodinamic analysis of the rotational shot put technique. *Track Coach*. 2007, 5769-5775.
6. **Goss-Sampson, M.A. and Chapman, M.** Temporal and kinematic analysis of the rotational shot put technique. *Journal of Sports Sciences*. 2003, 21:237-238.
7. **Gutiérrez, M., Soto V. M. and Rojas, F.J.** A biomechanical analysis of the individual techniques of the hammer throw finalists in the Seville Athletics World Cahmpionship, 1999. *New Studies in Athletics*, 2002, 17(2):15-26
8. **Hay, J.G.** *The biomechanics of sports techniques*. Englewood Cliffs, Prence-Hall (1973).
9. **Hochmuth, G.** *Biomechanik sportlicher bewegungen*. Berlin: Sportverlag (1967).
10. **Hubbard, M., Mestre, N. J. and Scott, J.** Dependence of release variables in the put. *Journal of Biomechanics*, 2001, 34:449-456.
11. **Lanka, J.** Shot Putting. In B. Zatsiorsky (Ed.), *Biomechanics in Sport*. pp.435-457, Blackwell Science Ltd, 2000.
12. **Leva, P.** Adjustment to Zatsiorsky-Selunanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*. 1996, 29(9):1223-1230.
13. **Lichtengerg D.B. and Wills J.G.** Maximizing the range of the shot put. *American Journal of Physics*, 1978, 46:446-549.
14. **Linthorne, N. P.** Optimum release angle in the shot put. *Journal of Sports Sciences*, 2001, 19:359-372
15. **Luhtanen, P., Blomquist, M. and Vääntinen, T.** A comparison of two elite putters using the rotational technique. *New Studies in Athletics*, 1997, 12 (4):25-33.
16. **Pierrine, J. J. and Edgerton V.R.** Muscle force-velocity and power-velocity relationships under isokinetic loading. *Medicine science and sport*, 1978, 10:149-156
17. **Stepanek, J.** Comparison of glide and the rotation technique in the shot put. In: L. Tsarouchas (Ed.), *Biomechanics in Sport*. (pp. 135-146), Hellenic Sports Research Institute Olympic Sport Centre of Athens, Greece, 1989.
18. **Tsirakoss, D. K., Bartlett, R.M. and Kollias, I.A.** A comparative study of the release and temporal characteristics of shot put. *Journal of Human Movement Studies*, 1995, 28:227-242.
19. **Zatsiorsky, V.M.** The Biomechanics of shot putting technique. In G. P. Brüggemann and J. K. Rühl (Eds) *Proceedings of the First International Conference on Techniques in Athletics*, 1. Köln: Deutsche Sporthochschule, 1990.
20. **Zatsiorsky, V. M. and Seluyanov, V.N.** Estimation of the mass and inertia characteristics of the human body by means of the best predictive regression equations. In: D. Winter et al. (Eds), *Biomechanics IX-B* (pp. 233-239). Human Kinetics Publishers, Champaign, Illinois, 1985.
21. **Wood, J. A. and Jennings, L.S.** On the use splines functions for data smoothing. *Journal of biomechanics*, 1979, 12:477-479.