

Relación entre las variables de proceso en la fase final de aceleración y las variables de producto en el lanzamiento de peso

F.J. ROJAS¹, M. GUTIÉRREZ-DÁVILA¹, J. CAMPOS².

¹Departamento de Educación Física y Deportiva. Universidad de Granada.

²Departamento de Educación Física y Deportiva. Universidad de Valencia.

Resumen

La técnica de la fase final del lanzamiento de peso, definida desde el comienzo de la última fase de apoyo doble hasta la suelta del peso, es muy similar entre los atletas a pesar de que previamente hayan utilizado un modelo técnico de lanzamiento en giro o en deslizamiento, el objetivo de este estudio ha sido analizar la interacción entre las variables biomecánicas que determinan el rendimiento en esta prueba atlética en su fase final. Se han analizado a los ocho finalistas del lanzamiento de peso hombres y a las ocho finalistas del lanzamiento de peso de mujeres durante su participación en el Campeonato del Mundo de Atletismo de Pista Cubierta, Valencia 08. 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 electrónico. El sistema de referencias ha sido un cubo con doce puntos distribuidos proporcionalmente en el espacio de lanzamiento. Finalmente, se utilizaron las técnicas de transformación lineal directa (DLT) para obtener las coordenadas espaciales. Los resultados obtenidos muestran las diferencias en las variables de proceso entre lanzadores y técnicas utilizadas, existiendo compromisos entre las variables temporales, distancias y velocidades analizadas, destacando que el ángulo utilizado en el lanzamiento es inferior al óptimo y que la velocidad del peso se muestra como factor de producto determinante en el rendimiento de esta especialidad atlética.

Palabras clave: Lanzamiento de peso, biomecánica, análisis 3D

Abstract

The technique of the final phase of the shot put, defined from the beginning of the last phase of double support up to the release of the ball, is very similar among athletes in spite of the fact, that before they have used a technical model of throwing, the rotational technique or the glide technique, the aim of this study has been to analyze the interaction among the biomechanical variables that determine the performance in this athletic event in its final phase. Men and women finalist (n=16) have been analyzed during their participation in the Championship of the World of Athletics, Valencia 08. There have been used photogrammetrical three-dimensional technologies (3D) from the filming of the gesture with two video cameras to 100 Hz and synchronized temporarily by means of an electronic system. The system of references has been a bucket with twelve points distributed proportionally in the space of throwing. Finally, the linear direct transformation techniques (DLT) were in use for obtaining the spatial coordinates. The obtained results show the differences in the process variables among putters and the techniques used, existing commitments among the temporary variables, distances and analyzed speeds, emphasizing that the angle used in the shot is lower than the ideal one and that the speed of the weight appears as factor of determinant product in the performance of this athletic speciality.

Keywords: Shot put, biomechanics, 3D analysis

Introducción

La descripción cinemática del lanzamiento de peso podría simplificarse teniendo en cuenta sólo dos periodos:

- a) un desplazamiento inicial del lanzador y la bola
- b) y el movimiento de aceleración final cuando comienza la última fase de apoyo doble hasta la suelta de la bola.

La peculiaridad del lanzamiento de peso reside en la dificultad que entraña realizar el desplazamiento inicial en un espacio muy reducido con respecto a las medidas antropométricas de los lanzadores [13]. Con el objeto de que la bola alcance la mayor distancia horizontal tras la suelta los lanzadores utilizan dos técnicas diferentes:

- a) la convencional, denominada también de deslizamiento o
- b) la técnica de rotación o en giro.

Las diferencias en el desarrollo de estas técnicas son evidentes, la técnica de lanzamiento en deslizamiento tiene como objetivo alcanzar la máxima velocidad del centro de gravedad durante su ejecución, mientras que la técnica de lanzamiento en giro además de acelerar la bola en la dirección del lanzamiento, incrementa su velocidad angular sobre un eje de rotación del sistema formado por el lanzador más el peso.

Dichas características hacen de este concurso una prueba donde la ejecución técnica, junto a los parámetros morfológicos y una adecuada aplicación de fuerzas, constituyen los factores biomecánicos esenciales para obtener las condiciones óptimas de despegue del peso de la mano del lanzador [7]. Tras el despegue, el peso se comporta similar a un proyectil, cuya trayectoria estará determinada por tres factores:

- a) la velocidad tangencial,
- b) la altura de despegue y
- c) el ángulo de lanzamiento.

$$e_x = \frac{V^2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha + V \cos \alpha \sqrt{(v \sin \alpha)^2 + 2gh}}{g}$$

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)
Tel: 958244387
Fax: 958249428,
e-mail: fjrojas@ugr.es

Además de estos tres factores, cuando se pretende determinar el alcance del lanzamiento, es necesario considerar la distancia horizontal de despegue del peso con respecto a la medición en círculo de lanzamiento, así como el efecto que puedan producir las resistencias aerodinámicas. Según varias aportaciones [2, 9, 13, 15], la velocidad tangencial de despegue constituye el factor más determinante para el alcance de lanzamiento, aunque analizar los factores que condicionan su valor es una tarea compleja que implica a la propia técnica utilizada durante el movimiento final de aceleración del peso, debiéndose realizar mediante una interacción óptima en la secuencia temporal de participación segmentaria [4, 12]. La altura de despegue está condicionada por los parámetros antropométricos del lanzador (especialmente la talla y la longitud de brazo), 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 [5] en la figura 1 se representan los factores biomecánicos que determinan el rendimiento en lanzamiento de peso.

Sin embargo, las características de la fase final del lanzamiento, objeto de estudio en esta investigación, son muy similares entre las dos técnicas utilizadas, teniendo como objetivo aplicar el máximo impulso sobre la bola en la dirección adecuada en donde variables cinemáticas, dinámicas y musculares interactúan y resuelven compromisos biomecánicos con el fin de conseguir el nivel óptimo de los factores que contribuyen al alcance del artefacto. 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.

En esta fase final de aceleración del peso la cadena de participación segmentaria posee dos fases diferenciadas, hasta el 60% del tiempo total de la fase de aceleración se produce un modelo de empuje o de participación simultánea de las articulaciones del tobillo, la rodilla y la cadera en extensión y, a continuación, el modelo de participación es secuencial, especialmente mediante la contribución de la extensión del codo y muñeca, manteniéndose el movimiento de rotación a través del eje vertical se mantiene hasta el despegue del peso.

Durante la fase final de aceleración, es determinante el incremento de velocidad, figura 2,

factor que se ha mostrado como crucial en el rendimiento de este deporte [7], por ello en este estudio se ha profundizado en la interacción entre las variables que determinan el rendimiento en esta fase decisiva del lanzamiento.

Por otro lado, entre los factores de producto indicados que condicionan la trayectoria aérea del peso, quizás el ángulo de lanzamiento sea el que más controversia ha motivado entre los investigadores. Desde una perspectiva teórica, [11] determinaron que el ángulo óptimo de lanzamiento debería ser alrededor de 42° para lanzamientos de elite mundial. Pero realmente los ángulos de lanzamiento alcanzados por la mayoría de los lanzadores de elite han sido inferiores a este valor [3, 7, 13, 14]. En este sentido, Zatsiorsky [16] y Linthorne [12] han explicado este hecho debido a

la acción de la gravedad sobre la componente vertical de la aceleración, así como a ciertas consideraciones relacionadas con la estructura y contribución muscular en el movimiento final del lanzamiento. De forma experimental, Hubbard, Mestre y Scott [8] 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 . Los estudios precedentes ponen de manifiesto la existencia de una estrecha relación entre los diferentes factores que determinan la trayectoria aérea del peso, considerando, así mismo, que las condiciones óptimas de relación entre estos factores esta estrechamente

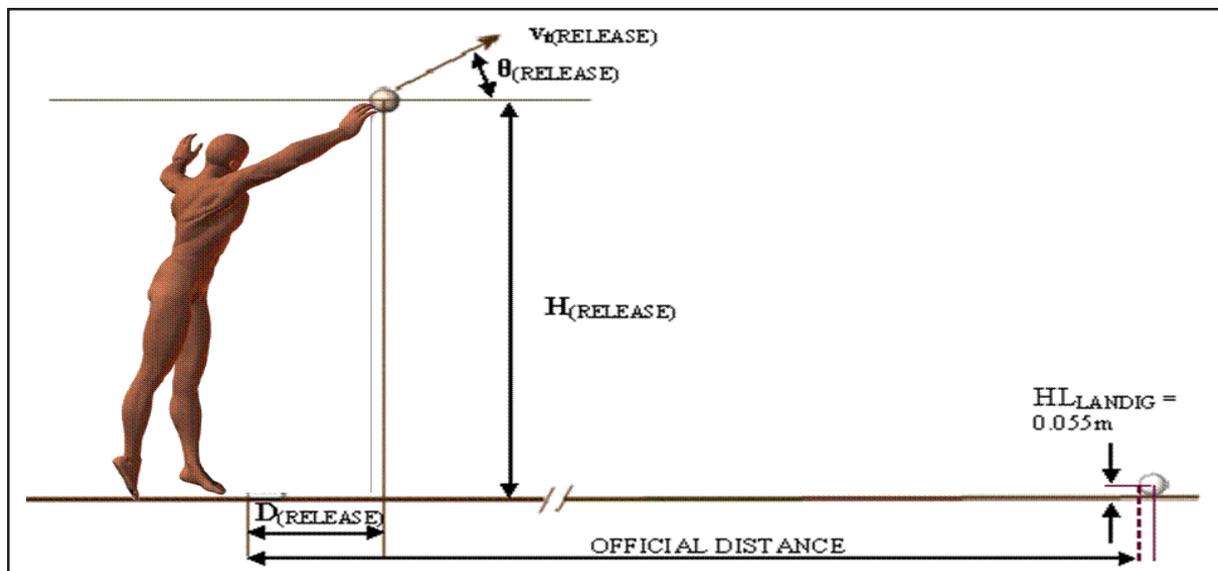


Figura 1. Factores biomecánicos que determinan el rendimiento en lanzamiento de peso

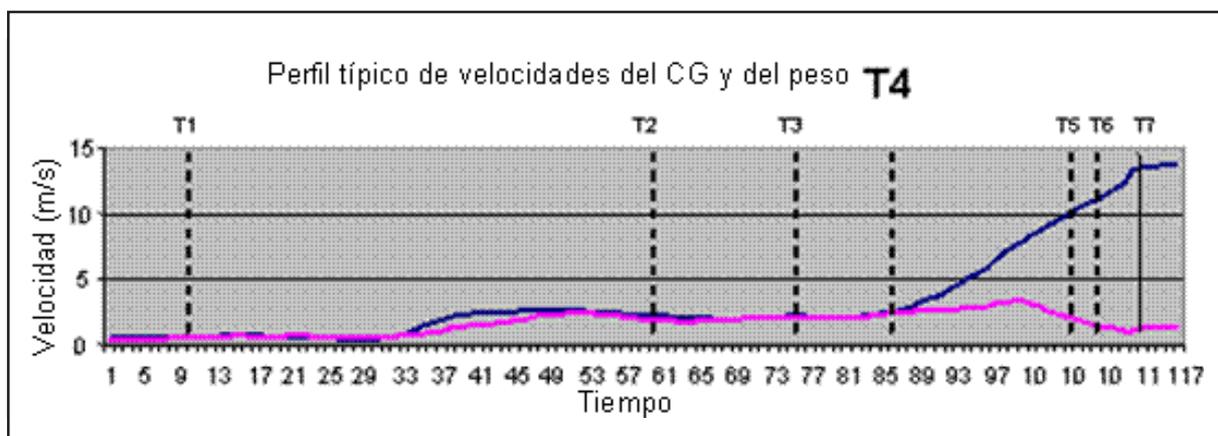


Figura 2. Perfil típico de la evolución de las velocidades del centro de gravedad del sistema y de la bola del lanzamiento, respectivamente, en el lanzamiento de peso

relacionada por la secuencia temporal de participación segmentaria durante la fase final de aceleración del peso.

El objetivo general de este estudio ha sido realizar un análisis de la relación entre, los factores temporales, distancias y velocidades en la fase de aceleración final del lanzamiento de peso y los factores que determinan el alcance en los lanzadores participantes en el campeonato del mundo de Valencia 2008.

Método

Se han analizado a los ocho lanzadores de peso masculinos y femeninos finalistas en el Campeonato del Mundo de Atletismo de Pista Cubierta, celebrado en Valencia, 2008. Se

registraron los seis lanzamientos de cada uno de los lanzadores, analizándose posteriormente el lanzamiento válido de mayor alcance para cada uno de ellos. En la tabla 1 se presenta los datos más relevantes de los lanzadores analizados, donde, además del país, talla y masa de los lanzadores, se presentan la distancias alcanzadas en los lanzamientos analizados (*Marca Val08*), así como la mejor marca obtenida durante la temporada 2007/08 (*Marca 07-08*).

Para el registro y análisis de los datos, se han utilizado técnicas fotogramétricas tridimensionales (3D) a partir de la filmación del gesto con dos cámaras de video de alta velocidad (*Redlake MotionSpace PCI 1000S – Redlake Corporation, San Diego, CA, USA*) a 100 Hz y sincronizadas temporalmente mediante un sistema

Atleta	País	Técnica	Altura (m)	Masa (Kg)	Val08-Result (m)	Season 07-08 (m)
HOMBRES						
Cantwell	USA	Giro	1.98	145	21.77	22.18
Hoffa	USA	Giro	1.83	118	21.20	21.40
Majewski	POL	Deslizamiento	2.04	132	20.93	20.51
Mikhnevich	BLR	Deslizamiento	2.02	115	20.82	20.77
Smith	NED	Giro	1.97	125	20.78	20.89
Scout	JAM	Giro	1.85	105	20.29	20.36
Martin	AUS	Giro	1.90	130	20.13	20.13
Sack	GER	Giro	1.90	----	20.05	20.88
MUJERES						
Vili	NZL	Deslizamiento	1.96	120	20.19	20.19
Ostapchuk	BLR	Deslizamiento	1.80	90	19.74	20.35
M. Li	CHN	Deslizamiento	1.74	80	19.09	18.55
González	CUB	Deslizamiento	1.80	76	18.75	18.75
Rosa	ITA	Giro	1.76	80	18.68	18.63
Schwanitz	GER	Deslizamiento	1.80	108	18.55	19.68
Borel-Brown	TRI	Deslizamiento	1.71	95	18.09	18.26
Omarova	RUS	Deslizamiento	1.80	----	17.13	19.09
* Debido a problemas técnicos no se analizó la mejor marca obtenida por Omarova ()						

Tabla 1. Características de los lanzadores analizados en este estudio, técnica utilizada y marca obtenida

electrónico. Después de obtener las coordenadas planas de los 21 puntos que determinan los catorce segmentos del cuerpo más el que corresponde al centro de masa del peso, se realizó un ajuste de dichas coordenadas mediante splines de quinto grado [17]. Finalmente, se utilizaron las técnicas de DLT, desarrolladas por Abdel-Aziz y Karara [1], para obtener las coordenadas espaciales con respecto a un sistema de referencia donde el eje Z corresponde al vertical, el Y al horizontal con sentido a la dirección teórica de lanzamiento y coincidente con la bisectriz del ángulo de lanzamiento y el X que se ha considerado perpendicular a los otros dos. Para el cálculo del CG del lanzador se han utilizado las masas segmentarias y localizaciones de su c.m., propuestas por Zatsiorsky & Seluyanov [16] y adaptadas por Leva [10].

Siguiendo a Gutiérrez, Rojas, Campos, Encarnación y Gámez [7], para el análisis temporal del movimiento final de aceleración del peso se han considerado tres fases: B₁) *Fase de apoyo doble*: comienza con el contacto del pie izquierdo (para lanzadores diestros) en el suelo o en el contenedor (T1) y finaliza con el despegue o deslizamiento por la superficie de uno de los dos apoyos (T2). B₂) *Apoyo simple*: finaliza con el despegue del segundo apoyo, en caso de que exista (T2) y B₃) *Fase aérea*: finaliza en el instante del despegue del peso de la mano del lanzador (T3). En algunos casos las dos últimas fases no se producen o suceden después de la suelta, por lo que el lanzamiento finaliza en apoyo doble y simple.

Para el cálculo de la velocidad tangencial de salida del peso, se ha utilizado la velocidad tangencial media entre la obtenida en el instante del despegue del peso de la mano del lanzador (T3) y la obtenida a 0,01 s posterior a ese instante (T4). El ángulo de salida del peso se ha calculado a partir del producto escalar entre el vector desplazamiento del peso tras el despegue, definido por las posiciones en los instantes T3 y T4 y su proyección en el plano transversal (X,Y). Las distancias calculadas en la fase final de aceleración HT1 (altura suelo en t1) HT3 (distancia al suelo en t3) y distancia de aceleración DA (distancia entre la posición en T1 y T3) y el incremento de altura durante la fase final del lanzamiento se muestran en la figura 3.

La estadística descriptiva e inferencial utilizada se ha basado en un análisis de la varianza entre los tipos de lanzamientos efectuados (en deslizamiento o en rotación) y un análisis de regresión múltiple entre los factores biomecánicos mediante el programa Statgraphics 5.1 de Statistical Graphics Corporation (STCS, Inc. 2115 East Jefferson Street, Rockville, Maryland, 20852, USA) que nos ha permitido valorar y relacionar los resultados obtenidos.

Resultados

En la tabla 2 se presentan los factores de producto obtenidos en los lanzamientos analizados, tanto para hombres como para mujeres. La velocidad de salida de la bola, ($VT3$), se ha

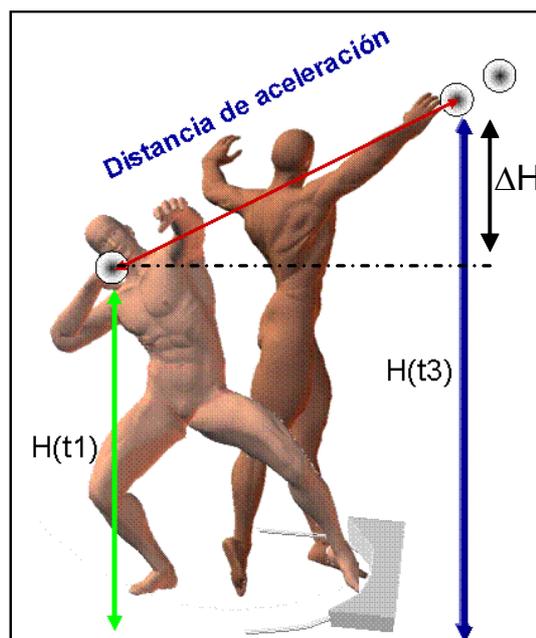


Figura 3. Representación gráfica de las variables, altura de la bola al suelo en t1, $H(t1)$ y en t3, $H(t3)$, el incremento de la altura ΔH y la distancia de aceleración

mostrado como el factor determinante en el alcance del lanzamiento. Para hombres, Cantwell es el que consigue mayor velocidad ($14,13 \text{ ms}^{-1}$) mientras que su ángulo de lanzamiento ($\theta_{(\text{RELEASE})}$) es el uno de los más reducidos (35°), manteniendo una distancia horizontal de despegue del peso ($D_{(\text{release})}$) relativamente alta (0,10 m). Una relación similar entre estos tres factores consigue Hoffa ($13,99 \text{ ms}^{-1}$, 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 ($13,38 \text{ ms}^{-1}$), un ángulo de lanzamiento de los más elevados (39°) y una distancia horizontal de despegue muy reducida (0,03 m).

Para las mujeres ocurre algo similar a lo descrito para los hombres. Vili, primera clasificada, es la que obtiene la mayor velocidad tangencial del peso en el despegue ($13,33 \text{ ms}^{-1}$), mientras que su ángulo de salida es uno de los más reducidos (36°), mientras que la distancia horizontal de despegue del peso es la más alta (0,20 m). Un caso que especial es el lanzamiento analizado de Ostapchuk, donde la lanzadora consigue una velocidad tangencial de salida del peso similar a la de Vili ($13,31 \text{ ms}^{-1}$), un ángulo de lanzamiento relativamente alto (39°), aunque pierde 0,23 m en la distancia horizontal de despegue del peso ($D_{(\text{release})}$).

<i>Athlete</i>	Velocidad VT3 (ms^{-1})	$H_{(\text{RELEASE})}$ (m) (%)		$\theta_{(\text{RELEASE})}$ ($^\circ$)	$D_{(\text{RELEASE})}$ (m) (%)	
Hombres						
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
Mujeres						
Vili	13.33	2.34	119.4	36	0.20	10.2
Ostapchuk	13.31	1.93	107.2	39	-0.03	-1.7
M. Li	13.10	1.93	110.9	36	0.12	6.9
González	12.83	2.12	117.8	43	0.04	2.2
Rosa	12.90	1.88	106.8	43	-0.05	-2.9
Schwanitz	12.80	1.83	101.7	38	0.01	0.6
Borel-Brown	12.83	1.87	109.4	36	0.15	8.8
Omarova	12.24	1.92	106.7	40	0.08	4.4

Tabla 2. Factores de producto de los lanzamientos analizados, donde Velocidad T3, es la velocidad tangencial del peso en el despegue; $H_{(\text{RELEASE})}$ es la altura de despegue, expresada en m y en % de la talla del lanzador; $\theta_{(\text{RELEASE})}$ es el ángulo de lanzamiento y $D_{(\text{RELEASE})}$ es la distancia horizontal de despegue del peso con respecto a la medición en círculo de lanzamiento, expresada en m y en % de la talla del lanzador

Según los datos generales expuestos en la tabla 2, 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 (VT3) 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 (VT3) 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 (Tabla 2). 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. Para mujeres, es Vili la que consigue una mayor altura, tanto cuando se expresa su valor en valores absolutos como cuando se expresa en porcentaje a su talla (2,34 m y 119.4%, respectivamente). A pesar de que su ángulo de salida mantiene valores medios (36°), la última fase de lanzamiento la realiza en salto. Todo lo contrario ocurre con el lanzamiento analizado de Schwanitz, donde se consiguen los valores más bajos en la altura de despegue del peso (1,83 m y 101%), mientras que el ángulo de despegue es algo superior a la media (38°), aunque debemos de considerar que esta lanzadora realiza la última fase del movimiento final en apoyo.

Con respecto al análisis de las velocidades del peso se puede apreciar en la tabla 3, la velocidad en t1, la velocidad en t3 y el incremento que se produce en la fase de aceleración como consecuencia del impulso aplicado por el atleta sobre la bola, pudiéndose observar en general, un mayor incremento en la velocidad con la técnica de rotación.

Según se podría deducir de la ecuación que relaciona el impulso aplicado sobre la bola en el intervalo de tiempo t3-t1 y el incremento que se produce en su velocidad en este intervalo de tiempo

$$\int_{t1}^{t3} F \cdot dt = m \cdot (V_3 - V_1) = \Delta C$$

cabría esperar una correlación positiva y significativa entre el incremento del tiempo de aplicación de fuerzas y el incremento de la velocidad final de la bola, sin embargo no se han hallado correlación entre el tiempo de aplicación de fuerzas y la velocidad de salida de la bola ($r = 0,19$ y $p = 0,67$) (Figura 4).

Aunque la distancia de empuje del peso en el movimiento final ($D_{(ACELERACION)}$) podría ser un factor estrechamente relacionado con la posibilidad de aceleración del peso y, consecuentemente, con la velocidad tangencial de éste en la suelta (VT3), según los datos expuestos, tampoco parece que, por sí solo, este factor se pueda relacionar con VT3. En general esta distancia tiene una relación directamente con la talla de los lanzadores ($R = 0,63$; $p < 0,01$). Cuando se expresan los datos en porcentajes de la talla, %Altura tiende a incrementarse cuando se reduce la altura del CG o del peso en la posición T1 con unos coeficientes de correlación de $R = -0,53$ y $-0,60$, respectivamente ($p < 0,05$).

Para hombres, Majewski es el lanzador que consigue una mayor distancia del empuje en el movimiento final (1,84 m; 90.2%, en valores absolutos y en % de la talla, respectivamente), siendo el que llaga más bajo a la posición T1 cuando los datos se expresan en porcentajes de su talla. En mujeres, un caso especial es el lanzamiento analizado de Rosa (única lanzadora analizada que lanza en rotación). Consigue una distancia de empuje en el movimiento final muy reducida (1,14 m; 64,8%, en valores absolutos y en % de su talla, respectivamente), su explicación está en la excesiva altura del CG en T1, especialmente cuando se expresa en % de la talla (50,6%). En general, los datos también ponen de manifiesto que $D_{(ACELERACION)}$ tiende a ser mayor cuando se utiliza la técnica tradicional ($86,58 \pm 3,37\%$ y $78,00 \pm 8,27\%$, para la técnica tradicional y la giratoria, respectivamente) y la altura del CG en T1 tiende a ser más baja cuando se utiliza la técnica tradicional ($45,4 \pm 1,3\%$ y $49,2 \pm 1,5\%$, para la técnica tradicional y giratoria, respectivamente). Como cabría esperar, los datos expuestos en la tabla 4 ponen de manifiesto que cuando se incrementa la distancia de empuje del movimiento final ($D_{(ACELERACION)}$), la aceleración media ($a_{m(TIME T1-T3)}$) tiende a ser más reducida

con un coeficiente de correlación de $R=-0,74$ ($p<0,005$).

En relación a la técnica utilizada, el incremento de altura es superior ($F=6,61$ $p=0,02$) 51%) en la técnica de deslizamiento frente al 42% en la técnica de rotación, lo que implica que el ángulo medio del desplazamiento de la bola es necesariamente superior en la técnica de deslizamiento frente a la técnica en giro, Figura 5.

El factor en el cual se han encontrado diferencias significativas ha sido en la altura de la bola al suelo en T1, Ht1; con respecto a la altura del lanzador, figura 6, factor que va resultar clave en la aceleración del peso en esta fase, ya que al partir desde una posición más baja, la acción de la gravedad va actuar en mayor medida sobre la técnica de deslizamiento, es decir con el mismo impulso, alcanzaría una velocidad menor la bola en la técnica de deslizamiento en el instante de salida.

Discusión y conclusiones

Los datos obtenidos en esta investigación confirman que la velocidad tangencial de despegue del peso es el factor más determinante para el alcance de lanzamiento, como ponen de manifiesto Bartonietz [2], Luhtanen et al [13] y Lanka [9]. Igualmente, nuestros datos confirman una clara relación entre la altura de despegue del peso ($H_{(t3)}$) y la talla de los lanzadores ($p<0,001$), siendo los valores obtenidos similares a los aportados por Stepanek (1989), Luhtanen et al [13] y Lanka [9] y Linthorne [12] para lanzadores de élite. Por el contrario, no se ha podido confirmar que exista una correlación entre la altura de lanzamiento ($H_{(t3)}$) y la velocidad tangencial en la suelta ($Vt3$), como ponen de manifiesto Hubbard, Mestre and Scott, [8]. Posiblemente esta discrepancia sea debida a la variabilidad existente entre los lanzadores analizados en este estudio. Los datos relativos al

Atleta	Técnica	Tiempo aceleración (Ta)			$\Delta v(t3-t1)$
			Vt1	Vt3	
Cantwell	Giro	0,21	1,18	14,13	12,95
Hoffa	Giro	0,23	1,11	13,99	12,88
Majewski	Deslizamiento	0,24	3,22	13,63	10,41
Mikhnevich	Deslizamiento	0,26	2,26	13,58	11,32
Smith	Giro	0,21	2,49	13,61	11,12
Scott	Giro	0,28	1,57	13,39	11,82
Martin	Giro	0,18	2,04	13,38	11,34
Sack	Giro	0,2	2,13	13,38	11,25
Vili	Deslizamiento	0,24	2,77	13,33	10,56
Ostapchuk	Deslizamiento	0,21	2,76	13,31	10,55
M. Li	Deslizamiento	0,2	2,97	13,1	10,13
González	Deslizamiento	0,26	3,1	12,83	9,73
Rosa	Giro	0,14	3,06	12,9	9,84
Schwanitz	Deslizamiento	0,25	2,48	12,8	10,32
Borel-Brown	Deslizamiento	0,2	2,38	12,83	10,45
Omarova	Deslizamiento	0,24	2,17	12,24	10,07

Tabla 3. Tiempo de aceleración (Ta), velocidades del peso en t1 (Vt1) y en t3 (Vt3) e incremento de la velocidad en esta fase ($\Delta v(t3-t1)$)

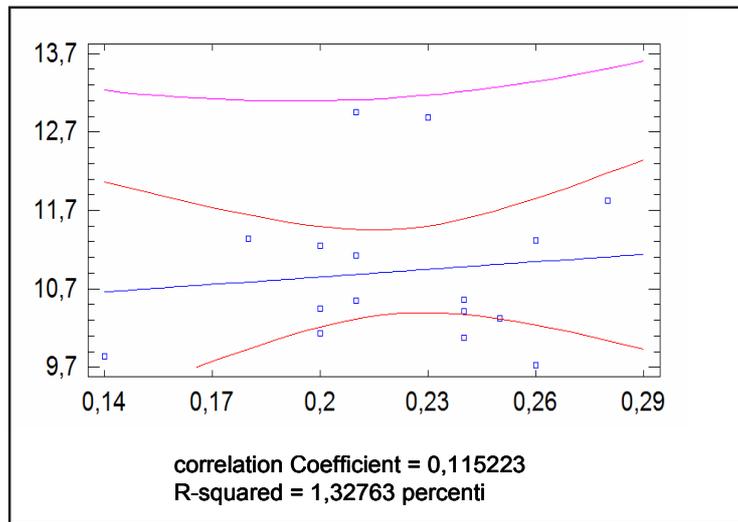


Figura 4. Representación gráfica del análisis correlacional entre el tiempo de aplicación de fuerzas y el incremento de la velocidad de la bola entre t3 y t1



Figura 5. Representaciones gráficas del ángulo medio del desplazamiento de la bola en relación a la técnica utilizada por los lanzadores

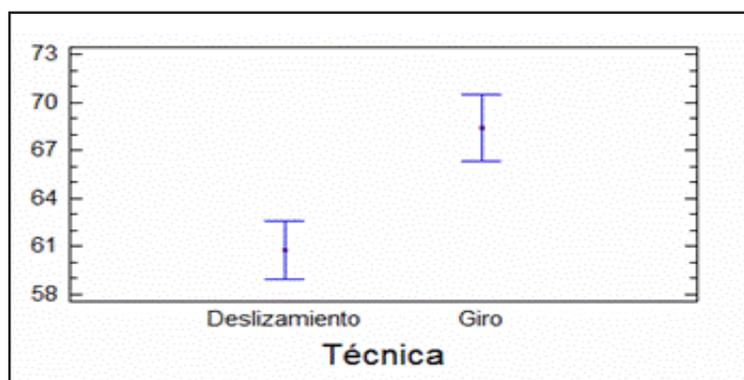


Figura 6. Distancia de la bola al suelo al comienzo de la fase de aceleración T1, Ht1, altura expresada en % con respecto a la altura del lanzador

		Distancia aceleración $D_{\text{aceleración}}$	%Altura	altura t1 Ht1	%T1	altura t3 Ht3	%T 3	incremento de altura ΔH	%INCR.	Ángulo medio t1-t3
Cantwell	Giro	1,51	76	1,35	68	2,1	106	0,75	38	30
Hoffa	Giro	1,6	87	1,25	68	2,08	114	0,83	45	31
Majewski	Deslizamiento	1,84	90	1,12	55	2,29	112	1,17	57	38
Mikhnevich	Deslizamiento	1,79	89	1,23	61	2,25	111	1,02	50	35
Smith	Giro	1,59	81	1,27	64	2,21	112	0,94	48	36
Scout	Giro	1,69	91	1,21	65	2,15	116	0,94	51	34
Martin	Giro	1,41	74	1,35	71	2,12	112	0,77	41	33
Sack	Giro	1,45	76	1,29	68	2,16	114	0,87	46	37
Vili	Deslizamiento	1,72	88	1,23	63	2,34	119	1,11	57	39
Ostapchuk	Deslizamiento	1,48	82	1,17	65	1,93	107	0,76	42	31
M. Li	Deslizamiento	1,46	84	1,09	63	1,93	111	0,84	48	35
González	Deslizamiento	1,65	92	1,12	62	2,12	118	1	56	37
Rosa	Giro	1,14	65	1,29	73	1,88	107	0,59	34	31
Schwanitz	Deslizamiento	1,55	86	1,07	59	1,83	102	0,76	42	29
Borel-Brown	Deslizamiento	1,44	84	1,11	65	1,97	115	0,86	50	37
Omarova	Deslizamiento	1,43	79	0,97	54	1,92	107	0,95	53	42

Tabla 4. Variables relacionadas con las distancia recorrida por la bola, distancia de aceleración D_a , y las distancias de la bola al suelo en t1, Ht1 y en t3, Ht3, también expresadas en relación a la talla de los atletas, incremento de la altura del peso (ΔH) y el ángulo medio del desplazamiento de la bola de t1 a t3

ángulo de salida del peso ($\theta_{\text{(RELEASE)}}$) mantienen valores similares a los obtenidos por Bartonietz y Borgström, [3]; Tsirakoss et al. [14]; Luhtanen et al [13], confirmando que cuando se incrementa el ángulo de salida, la velocidad tangencial del peso en la suela ($Vt3$) tiende a ser más reducida ($p < 0,01$), como ponen de manifiesto Hubbard, Mestre y Scott [8].

La distancia horizontal de despegue del peso ($D_{\text{(aceleración)}}$) 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 ($\theta_{\text{(RELEASE)}}$), 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 ($\theta_{\text{(RELEASE)}}$) tiende a reducirse, la velocidad tangencial del peso en la suelta, $Vt3$, y la distancia

horizontal de despegue ($D_{\text{(aceleración)}}$) se incrementan. Dos correlaciones que confirman la dependencia que existe entre los factores de producto, como ponen de manifiesto Zatsiorsky [15] y Linthorne [12], 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 sido la distancia de empuje del peso en el movimiento final ($D_{\text{(aceleración)}}$). 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, $D_{\text{(aceleración)}}$ 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 T1 tiende a reducirse ($P < 0,05$).

Finalmente, los datos confirman que cuando se incrementa la distancia de empuje del movimiento final ($D_{(aceleración)}$), la aceleración media (a_m) 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 Perrine and Edgerton (1978) sobre la capacidad individual de la musculatura para desarrollar fuerza.

La fuerza de la gravedad se muestra como factor determinante, influyendo sobre la dirección del impulso aplicado sobre la bola en la fase final de aceleración. Los lanzadores resuelven el compromiso que supone la fuerza de la gravedad disminuyendo el ángulo óptimo de lanzamiento, lo que les posibilita incrementar la velocidad de la bola, más acusado en la técnica de rotación. Un aumento del ángulo, aproximándolo al ángulo óptimo de salida, 41° , [12], implicaría una disminución en la velocidad de salida, aunque se aplicara el mismo impulso. Por otro lado, y desde el punto de vista muscular, un incremento del ángulo también supondría una menor eficiencia mecánica de los músculos flexores del hombro, cuya orientación de sus fibras produce mayor tensión en ángulos próximos a la horizontal entre el brazo y el suelo.

Bibliografía

1. **Abdel-Aziz, Y.J. y Karara, H.M.** (1971). 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.
2. **Bartonietz, K.** (1994). Rotational shot put technique: Biomechanics findings and recommendations for training. *Track an Field Quarterly Review*, 93, 3: 18-29.
3. **Bartonietz, K and Borgström, A.** (1995). The throwing events at the World Championships in

- Athletics 1995, Gotebörg – Technique of the world's best athletes. Part I: Shot put and hammer throw. *New Studies in Athletics*, 10, 4: 43-63.
4. **Coh, M. and Stuhec, S.** (2005). 3-D kinematic analysis of the rotational shot put technique. *New Studies in Athletics*, 20, 3: 57-66.
5. **Coh, M. Supej, M. and Stuhec,** (2007). Biodinamic analysis of the rotational shot put technique. *Track Coach: 5769-5775*.
6. **Goss-Sampson, M.A. and Chapman, M.** (2003). Temporal and kinematic analysis of the rotational shot put technique. *Journal of Sports Sciences*. 21: 237-238.
7. **Gutiérrez, M.; Rojas F.J.; Campos, J. and Gómez, J.** (2009). Análisis de la técnica individual de los finalistas en el Campeonato del Mundo de Atletismo, Valencia 08, del lanzamiento de peso. *New Studies in Athletics*, (en prensa).
8. **Hubbard, M., Mestre, N.J. and Scott, J.** (2001). Dependence of release variables in the put. *Journal of Biomechanics*, 34: 449-456.
9. **Lanka, J.** (2000). Shot Putting. In B. Zatsiorsky (Ed.), *Biomechanics in Sport*. (pp.435-457) Blackwell Science Ltd.
10. **Leva, P. de** (1996). Adjustment to Zatsiorsky-Selunanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*. 29, 9: 1223-1230.
11. **Lichtengerg D.B. and Wills J.G.** (1978). Maximizing the range of the shot put. *American Journal of Physics*, 46: 446-549.
12. **Linthorne, N.P.** (2001). Optimum release angle in the shot put. *Journal of Sports Sciences*, 19: 359-372
13. **Luhtanen, P., Blomquist, M. and Vääntinen, T.** (1997). A comparison of two elite putters using the rotational technique. *New Studies in Athletics*, 12, 4: 25-33.
14. **Tsirakoss, D.K., Bartlett, R.M. and Kollias, I.A.** (1995). A comparative study of the release and temporal characteristics of shot put. *Journal of Human Movement Studies*, 28: 227-242.
15. **Zatsiorsky, V.M.** (1990). 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.
16. **Zatsiorsky, V.M. and Seluyanov, V.N.** (1985). 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.
17. **Wood, J.A. and Jennings, L.S.** (1979). On the use splines functions for data smoothing. *Journal of biomechanics*, 12: 477-479.