

Descripción de la biomecánica del lanzamiento de martillo

Biomechanic description of hammer throw

Javier Bermejo Frutos

Universidad Católica San Antonio de Murcia

Resumen: todo movimiento posee una estructura biomecánica cinemática y cinética. El presente artículo realiza una revisión de los factores biomecánicos cinemáticos que inciden en la ejecución técnica del lanzamiento de martillo, determinando su eficacia, y que permiten explicar cómo y por qué se realizan determinadas acciones. Se parte de una descripción global y genérica de la prueba para progresar hasta el análisis técnico y biomecánico de los movimientos que se producen. Para ello, el movimiento se divide en diferentes fases o partes en función de la temporalidad de las acciones y de las divisiones realizadas por la bibliografía. A partir de esta división, se realiza un análisis de los movimientos para comprender los principios teóricos que rigen las acciones técnicas y las posibilidades de optimización de la técnica.

Palabras clave: cinemática, rendimiento, atletismo, técnica.

Abstract: any movement has a kinematic and kinetic biomechanical structure. This article reviews the kinematic factors affecting the technical execution of the hammer throw, determining their effectiveness, and explaining how and why actions are performed. It progress from a global and generic description to a technical and biomechanical analysis of movements. To do this, the movement is divided into different phases or parts depending on the timing occurrence and divisions by the literature. From this division, an analysis of the movements is made to understand theoretical principles governing the technique execution and possibilities to optimize technique.

Keywords: kinematics, performance, athletics, technique.

Introducción

El lanzamiento de martillo se engloba dentro de los concursos atléticos de lanzamiento, junto con el peso, el disco, y la jabalina (Durán, 2000). Se trata de un lanzamiento de tipo lateral (Bartlett, 2007) y se clasifica como un movimiento técnico específico de tipo acíclico angular (Rius, 1990). El objetivo es lograr la máxima distancia horizontal (Lee, Liu, Lin, & Huang, 2000), a través de la suelta de un artefacto denominado martillo con la mayor altura de liberación, mayor velocidad de salida, y con un ángulo de proyección adecuado (Gutiérrez & Soto, 2001). El martillo consiste en una bola de 4 kg de peso en mujeres y 7.260 kg en hombres (Hunter, 2003), que se encuentra unida a un asa por medio de un cable de acero de 1.20 m desde el agarre hasta el punto más distal de la superficie de la bola (Burkett, 2010). El deportista dispone de tres intentos con posibilidad de mejora (tres lanzamientos más), siempre y cuando su marca hasta el tercer lanzamiento se encuentre entre las ocho mejores (IAAF, 2012).

Para lanzar el martillo, el atleta ejecuta una serie de movimientos específicos dentro de un círculo de 2.135 m de diámetro (Laruel, Wilson, & Young, 2004) y lo proyecta en un área de lanzamiento de 34.92° (Umegaki et al., 2009; Wilson, Guy, & Matrahazi, 2006). En los movimientos del lanzamiento de martillo, se realizan dos o tres volteos estáticos del artefacto previos a la ejecución de tres o cuatro giros simultáneos a un desplazamiento lineal dentro del círculo (Fujii, Byun, Ogata, & Fujii, 2009; Gutiérrez, Soto, & Rojas, 2002; Lee et al., 2000; Maheras, 2009). Durante los volteos, el lanzador pone en marcha y acelera el martillo haciéndolo girar alrededor de su cuerpo (Morris & Bartlett, 1991). Durante los giros, el lanzador rota con el artefacto sobre un eje vertical sosteniendo el martillo alejado del cuerpo (Dapena, 1989a) y lo combina con un movimiento de traslación a través del círculo desde la parte de atrás hacia la parte de delante (Dapena, 1984, 1986).

Se trata de una tarea técnicamente compleja (Allegretti, Pombo, Persinotti, Alves, & Leite, 2007), que requiere el dominio del deportista de la técnica, y necesita de años de experiencia y elevados niveles de fuerza para conseguir un lanzamiento largo (Sale, 2002). De todos los lanzamientos, este posiblemente sea el más espectacular desde el punto de vista visual (Eckschmiedt & Mecseki, 2000), aunque también es el

más complejo de analizar a simple vista por varias razones: la separación que existe entre la ubicación del entrenador y la zona de lanzamientos, la existencia de una red que dificulta la observación de la técnica por parte del entrenador, la compleja estructura temporal y el elevado tiempo utilizado en lograr la velocidad final, la modificación en el plano de movimiento del martillo, y la elevada velocidad a la que se ejecutan los movimientos dentro del círculo (Gutiérrez, Rojas, & Soto, 1999; Gutiérrez & Soto, 2001; Gutiérrez et al., 2002).

A continuación se realiza un análisis de la técnica del lanzamiento de martillo desde una perspectiva descriptiva y cualitativa, diferenciando diferentes fases del movimiento en función de su temporalidad. Este punto se combina con un análisis biomecánico de los movimientos que se producen dentro del círculo, explicando los principios de la mecánica que rigen las acciones del deportista. Tras esto, se enumeran y explican las variables cinemáticas que determinan el rendimiento de la prueba en la fase de suelta, teniendo en cuenta que se trata de un movimiento de tipo parabólico. En este apartado se facilitan algunos valores de referencia procedentes de investigaciones descriptivas.

Método

Para elaborar el presente artículo divulgativo sobre la descripción técnica del lanzamiento de martillo se ha recurrido a dos fuentes fundamentales: a) teorías, conceptos, y principios de la mecánica que aparecen en diferentes libros y artículos divulgativos de temática biomecánica; b) resultados de investigaciones originales llevadas a cabo para la prueba de lanzamiento de martillo que aparecen en publicaciones de nivel nacional e internacional. El criterio para seleccionar los libros y revistas que fundamentasen el artículo ha sido que se trate de publicaciones que versen sobre biomecánica y/o atletismo con nivel de impacto o en su defecto que sean publicaciones ampliamente aceptadas dentro de la comunidad científica en ciencias del deporte. Las revistas consultadas como fuentes primarias que finalmente han fundamentado la redacción han sido: *Apuntes; Athletics Coach; Cuadernos de Atletismo; Exercise and Sport Science Review; International Journal of Sports Science and Coaching; Journal of Applied Biomechanics; Journal of Biomechanics; Journal of Health, Physical Education and Recreation; Journal of Human Sport and Exercise; Journal of Sports Sciences; Medicine and Science in Sports and Exercise; Modern Athlete and Coach; New Studies in Athletics; Research Quarterly for Exercise and Sport; Revista Biomecánica; Revista de Investigación en Ciencias del Deporte; Track Coach; Track Technique; y Sports Biomechanics*. Además, se han consultado las bases de datos de los congresos llevados a cabo por la

International Society of Biomechanics in Sport y por la American Society of Biomechanics. Otras publicaciones consultadas pero cuyo contenido no se ajustaba a las demandas del artículo han sido: Acción Motriz; Agon (International Journal of Sport Sciences); Cultura, Ciencia y Deporte; Kronos; Motricidad; Revista de Entrenamiento Deportivo; Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte; Revista Movimiento Humano.

Técnica del lanzamiento de martillo

Las acciones que realiza el deportista en un lanzamiento de martillo son descritas por la bibliografía utilizando una división del gesto en diferentes fases o partes más simples. A nivel global, se pueden definir tres fases en función de su temporalidad (Bingisser & Jensen, 2011; Durán, 2000; Judge, 1999; Petrov, 1980): volteos, giros, y suelta.

Volteos

El objetivo de esta fase es generar una cantidad suficiente de inercia sobre la cabeza del martillo y que éste adquiera una trayectoria adecuada, que permita entrar en los giros con una disposición mecánica, postural y cinemática, adecuada (Gutiérrez & Soto, 2001). Para lograr estos dos objetivos, el deportista realiza generalmente dos volteos (Petrov, 1980). Los volteos del martillo consisten en hacerlo girar alrededor del cuerpo describiendo una trayectoria de tipo elipsoidal (Bingisser & Jensen, 2011; Judge, 1999). Durante los volteos existen dos fases: volteo por delante y volteo por la espalda.

Durante el volteo por delante (tabla 1), los brazos se mantienen en una posición estirada llevando la cabeza del martillo lo más lejos posible, se produce una aceleración positiva, y se registra el punto más bajo de la trayectoria del martillo delante del cuerpo entre los pies o ligeramente a la derecha (Petrov, 1980). Llevar los brazos extendidos durante el volteo por delante permite crear una cantidad suficiente de momento angular (al permanecer constantes la masa del sistema y la velocidad angular de giro, el incremento en la distancia radial entre el eje de rotación y la cabeza del martillo produce un aumento de la velocidad lineal del punto más alejado). Esta acción permite llegar al primer giro con una velocidad adecuada que suele representar el 40-50% de la velocidad final (Durán, 2000).

Tabla 1. Criterios para el análisis técnico de la fase de volteo en el lanzamiento de martillo (Gaede, 1990).



Representación gráfica	Referencia	Criterio de valoración
	ABC - cabeza A - brazos BC - brazos A - martillo BC - martillo C - tronco BC - caderas ABC - rodillas ABC - peso	Elevada, de cara a la dirección de lanzamiento Izquierdo: flexionado, derecho: extendido Flexionados (a la altura del hombro) Plano, alejado a la izquierda Plano, detrás de la espalda Vertical (máxima torsión) Cadera derecha: bloqueada Ligeramente flexionadas Sobre las dos piernas (centrado)

Tabla 2. Criterios para el análisis técnico de la transición al primer giro en el lanzamiento de martillo (Gaede, 1990).

Representación gráfica	Referencia	Criterio de valoración
	EF - cabeza D - brazos EF - brazos E - martillo DEF - tronco DEF - rodillas EF - pierna pivote EF - pierna libre DEF - peso	Elevada, sigue al martillo Izquierdo: extendido, derecho: flexionado Extendidos (triángulo hombros-brazos) En el punto más bajo Ligeramente inclinado hacia delante Flexionados (posición sentado) Rotación interna sobre el talón Retrasada sobre la parte media del pie Sobre ambas piernas

Durante el volteo por la espalda (tabla 2), los brazos se flexionan pero se deben extender tan pronto como sea posible (Bingisser & Jensen, 2011). Flexionar los brazos durante el volteo por la espalda permite realizar un paso rápido del martillo hacia la fase de aceleración a través de la modificación del radio de giro, que tiene como eje de rotación el hombro izquierdo (Judge, 1999). Reducir el radio de giro cuando se realiza el volteo del martillo por la espalda produce un incremento de la velocidad angular para llegar rápido a la fase de aceleración y permite conservar el momento angular.

La acción de volteo del tren superior se combina con una posición corporal estable y equilibrada del tren inferior. Esto es debido al momento de fuerza desequilibrante que ejerce el martillo sobre el deportista,

como consecuencia de su elevada masa y de la rotación alrededor del cuerpo (la elevada masa del martillo le otorga a éste un momento de inercia, que es la tendencia a mantener el estado de movimiento a menos que una fuerza actúe sobre él). Para ello, el lanzador adopta una posición con los pies separados a la anchura de los hombros proporcionando una buena base de sustentación, las rodillas flexionadas para descender el centro de masas del deportista, y el tronco alineado verticalmente de forma que la proyección vertical sobre la base de sustentación en cada punto del volteo permita un equilibrio estable (Judge, 1999). Esta posición proporciona equilibrio, estabilidad, y permite conservar el momento angular (Bingisser & Jensen, 2011).

Giros

Los giros se inician en el apoyo biopodal, con el martillo ubicado lejos del lanzador ligeramente a la derecha con los brazos extendidos, y finalizan al volver de nuevo al apoyo bipodal tras las fase de giro sobre un apoyo simple. El objetivo de esta fase es acelerar y cambiar el plano de movimiento del martillo para que al llegar a la fase de suelta se pueda proyectar con una velocidad máxima y un ángulo próximo a los 40° (Gutiérrez & Soto, 2001). Para ello, el lanzador realiza una serie de giros que oscilan entre 2-4 dependiendo de la habilidad, de la velocidad, y de la fuerza de los atletas (Judge, 1999). Los giros combinan acciones de desplazamiento rotatorio y desplazamiento de traslación lineal (Dapena, 1984, 1986, 1989a), alternando fases de apoyo unipodal y bipodal (Gaede, 1990).

Desde un punto de vista biomecánico, cuando se estudian las acciones del deportista y el artefacto durante los giros en un lanzamiento de martillo, se pueden diferenciar distintos tipos de movimiento (figura 1), en función de si se analiza el movimiento como un único sistema que se desplaza de forma conjunta por el círculo o en función de si se analiza únicamente el movimiento del martillo. Cuando se analiza al sistema lanzador-artefacto de forma conjunta existen dos tipos de movimiento: a) movimiento de rotación alrededor de un eje vertical común (Dapena, 1989a), y b) movimiento de traslación en dirección a la zona de lanzamiento (Dapena, 1984). Cuando se analiza el movimiento del martillo en relación a un sistema de referencias inercial, el movimiento global se compone por tres tipos de movimiento (Dapena, 1984, 1986, 1989a; Gutiérrez & Soto, 2001): a) rotación del martillo a través de un eje vertical (Z), b) rotación a través de un eje longitudinal (X), c) desplazamiento del sistema. De estos tipos de movimiento, los que más importancia tienen desde el punto de vista técnico son los movimientos de rotación: movimiento de rotación alrededor de un eje vertical común y movimiento circular del martillo alrededor del atleta.

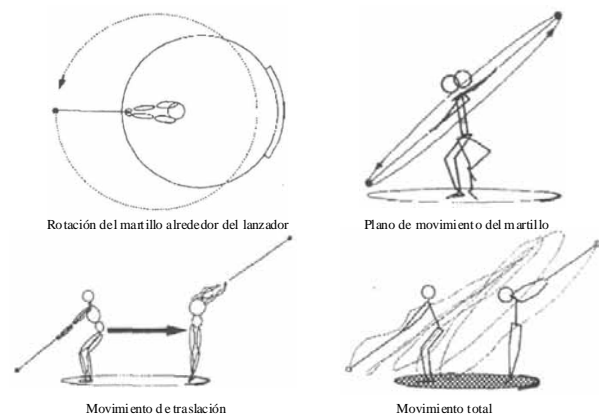


Figura 1. Representación de los movimientos del lanzador y el martillo (Gutiérrez & Soto, 2001).

El movimiento circular del martillo alrededor del atleta (posición del martillo en cada fase o instante del lanzamiento) se determina a través de un sistema de posicionamiento basado en ángulos (figura 2). Para ello, el lanzamiento se observa desde una perspectiva superior como una circunferencia graduada que se dibuja sobre el círculo de lanzamiento, donde la dirección 0-180° es coincidente con la bisectriz del ángulo que determina el sector de lanzamiento, según las coordenadas referidas al

sistema de referencias (Gutiérrez & Soto, 2001). Este método de determinar las posiciones de la cabeza del martillo se conoce con el nombre de ángulo azimutal (Samozvetov, 1971).

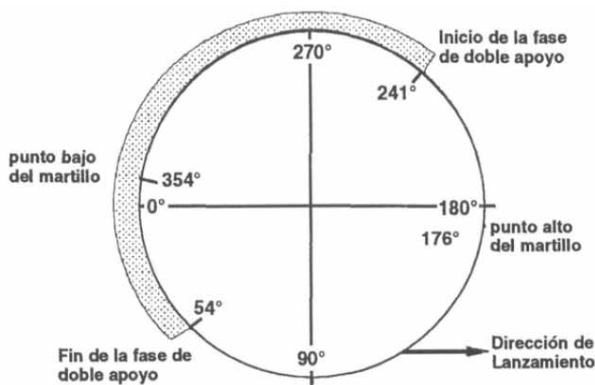


Figura 2. Representación del ángulo azimutal del martillo durante el movimiento de rotación cuando se realizan los giros (Gutiérrez & Soto, 2001).

El movimiento de rotación del sistema lanzador-martillo se produce sobre un eje vertical que pasa por el punto de apoyo y por el centro de gravedad del sistema (figura 3), donde a un lado se encuentra la masa del martillo y a otro lado la masa del lanzador. Por tanto, en este sistema hay dos masas que giran juntas unidas por un cable, una grande (el lanzador) y una pequeña (la cabeza del martillo). De este modo, el radio de giro del martillo está condicionado por la masa del lanzador, sus parámetros antropométricos y la posición adoptada. Cuanto mayor sea la masa del lanzador, el CG estará más próximo a él y más alejado de la cabeza del martillo. Cuanto más alto y envergadura tenga el lanzador mayor distancia existirá entre las masas. El lanzador adopta una posición de equilibrio estable (Durán, 2000; Hay, 1993): a) flexionando las rodillas (posición sentada), lo que produce un descenso del centro de gravedad sobre la base de sustentación; b) contrarrestando la magnitud de fuerza de la cabeza del martillo (fuerza centrífuga) con la fuerza que ejercen los brazos en la dirección opuesta (fuerza centrípeta).

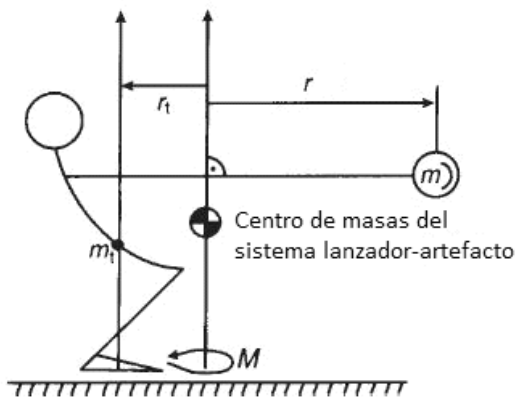


Figura 3. Representación del sistema lanzador-artefacto (Maronski, 1992).

Durante la rotación del sistema lanzador-martillo el criterio de eficacia más importante es el momento angular que posee el martillo. La fórmula que expresa este término es el producto entre el momento de inercia ($I = m \times r^2$) y la velocidad angular (ω): $L = I \cdot \omega = m \cdot r^2 \cdot \omega$ (donde: m, es la masa; r, es el radio; ω , es la velocidad angular). Por tanto a partir de la fórmula del momento angular se pueden adoptar tres estrategias para mejorar el rendimiento en el movimiento de rotación: a) incrementar la masa del sistema, b) incrementar el radio de giro de la cabeza del martillo (distancia radial), c) incrementar la velocidad angular a la que se desplaza la cabeza del martillo. Estas estrategias se pueden relacionar con aspectos de tipo antropométrico, aspectos de tipo técnico, y aspectos de tipo físico, respectivamente.

El **incremento de la masa** no se contempla, puesto que las características del artefacto están determinadas por el reglamento (masa cons-

tante) y el incremento en el peso del deportista (durante la temporada) tiene un nivel de variación muy pequeño a nivel porcentual (Dapena, 1986).

El **incremento del radio del martillo** (comprendido entre el centro de gravedad del sistema lanzador más martillo y el centro de la cabeza del martillo) está determinado por las características antropométricas de envergadura (determinado genéticamente) y por el dominio de la técnica del deportista. Para conseguir una elevada distancia radial, los lanzadores llevan durante los giros los brazos extendidos (Gaede, 1990). La forma de entender el por qué los lanzadores llevan los brazos extendidos es la relación entre velocidad angular y velocidad lineal: cuando el martillo gira, si se observa desde una perspectiva cenital, describe un círculo. Si se toman como referencia la trayectoria que describe el punto que representa la parte media del cable y la bola (figura 4), se puede observar como llevando una misma frecuencia de giro (por ejemplo, 360 °/s) completan círculos de diferente tamaño (el punto más alejado se mueve más rápido). Tomando la fórmula de los movimientos rectilíneos, el punto más alejado del eje de rotación (mayor radio de giro) recorre un mayor espacio en una misma cantidad de tiempo, por lo que registrará una mayor velocidad lineal (Blazevich, 2007). Este aspecto explica la posición que adoptan los lanzadores durante los giros y el por qué una elevada envergadura puede ser beneficiosa ante dos deportistas con las mismas capacidades físicas de fuerza (Hay, 1980). Considerando una misma velocidad angular de la cabeza del martillo, cuanto mayor es el radio de giro, mayor será la velocidad tangencial o lineal (Bartonietz, Barclay, & Gathercole, 1997).

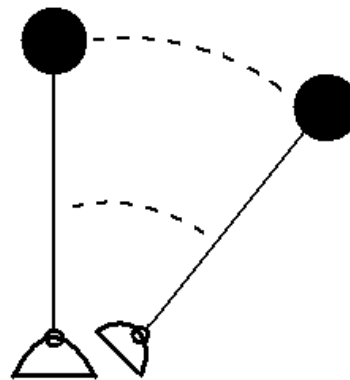


Figura 4. Representación de dos trayectorias del martillo (creación propia).

En función de si el deportista percibe que no está girando con la suficiente velocidad, se pueden adoptar estrategias para acortar y alargar la distancia radial (figura 5). Algunas de las estrategias que se utilizan son: a) tirar del cable alternativamente delante-atrás a través de la flexión de cadera, que produce un incremento del radio de giro hasta de 26 cm y aumenta la longitud del camino de aceleración hasta 6.5 m (Petrov, 1980), y b) producir un acortamiento-alargamiento de la distancia entre

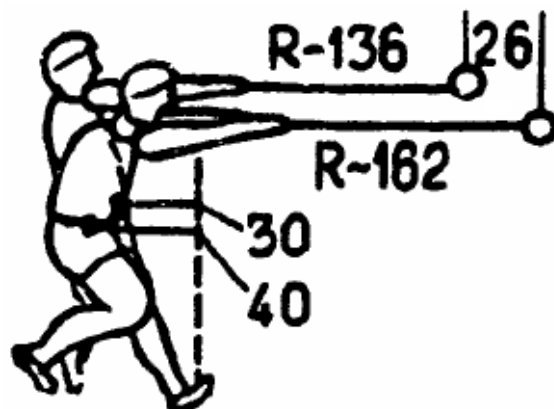


Figura 5. Representación de la acción para incrementar el radio de giro a través de la flexión de cadera (Petrov, 1980).

la cabeza del martillo y el centro de su trayectoria de giro a través de la flexión-extensión del brazo (Dapena & Feltner, 1989), aunque esta estrategia es menos deseable.

El **incremento de la velocidad angular** está determinado fundamentalmente por la posibilidad de aplicar momento de fuerza. El objetivo durante los giros es conseguir que la cabeza del martillo adquiera un elevado momento angular (relaciona el radio, la masa, y la velocidad angular), que se incrementa desde el primer giro hasta el último (Dapena, 1989b, Dapena & Feltner, 1989). El incremento o variación del momento angular del sistema lanzador-martillo es un impulso angular que depende del momento de fuerza que puede ejercer el lanzador en el suelo (sistema de dos masas, una grande y otra pequeña que giran a través de un eje que pasa por su centro de gravedad). La fuerza centrípeta tiende a desplazar al martillo hacia fuera, pero también al lanzador en sentido opuesto (dos masas que giran a través de un eje común) (Gutiérrez & Soto, 2001). Con este sistema el lanzador no tiene que oponerse a esta fuerza, simplemente produce una gran tensión que se manifiesta en el cable (figura 6) (Brice, Ness, Rosemond, Lyons, & Davis, 2008). Esta fuerza se ha correlacionado de forma positiva con la distancia de lanzamiento (Pataki & Ramacsay, 1982) y depende de la aceleración centrípeta y la masa. La aceleración centrípeta está relacionada directamente con la velocidad lineal e inversamente con el radio de giro (pero de las dos masas y en sentido opuesto).

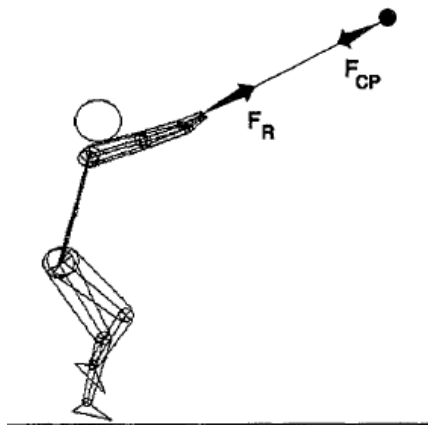
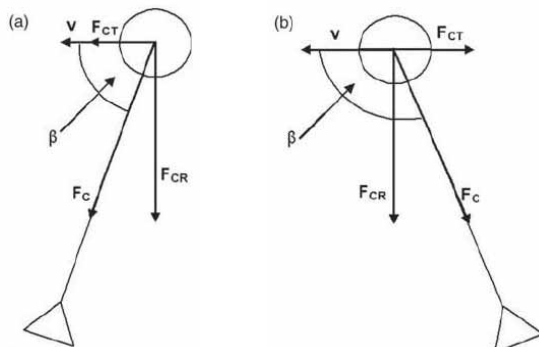


Figura 6. Representación de la fuerza del lanzador sobre el cable y de la bola sobre el cable (Gutiérrez & Soto, 1993).

Las fuerzas que se producen durante los giros en el martillo se pueden descomponer en diferentes vectores (figura 7). El componente tangencial (fuerza tangencial) afecta a la velocidad lineal de la cabeza del martillo y depende de la tensión que ejerza el lanzador a través del cable (Brice, Ness, & Rosemond, 2011). Cuando la tensión se ejerce en sentido del giro (durante los volteos, el apoyo doble, y la fase final de suelta) se produce una aceleración positiva que favorece el avance de la cabeza del martillo. Cuando la tensión se ejerce en sentido contrario al giro (durante la primera parte del apoyo simple, hasta que la cabeza del martillo alcanza el punto más alto) se produce una aceleración negativa



Leyenda: F_C = fuerza del cable; F_{CR} = componente tangencial de la fuerza del cable; F_{CT} = componente radial de la fuerza del cable; V = velocidad lineal de la cabeza del martillo; β = ángulo entre la velocidad lineal a la fuerza del cable.

Figura 7. Fuerzas que se producen durante los giros cuando el vector de la fuerza del cable está tirando delante de la dirección del radio de rotación (a) y detrás (b) (Brice et al., 2011).

que frena la velocidad de giro de la cabeza del martillo (Durán, 2000). En este sentido, para disminuir la aceleración negativa de la cabeza del martillo se opta por reducir el ángulo que la fuerza del cable queda por detrás del radio de rotación (Brice et al., 2011).

Finalmente, para conseguir llegar a la suelta con la máxima velocidad angular del artefacto es necesario que se produzca una «conservación del momento angular». La conservación del momento angular es necesaria en la rotación del deportista con el artefacto por el círculo. El lanzador determina este aspecto con una correcta o incorrecta técnica, pero también el material que viste, ya que el rozamiento que produce el calzado cuando se desliza por el suelo tiende a frenar al giro (no sólo tiene efecto negativo sobre el momento angular, sino que se utiliza para mantener al deportista en su desplazamiento circular durante los giros). Para disminuir el rozamiento y conservar el momento angular, el deportista viste un calzado específico y realiza los giros con una posición determinada de los pies (Maheras, 2009). Esta posición se caracteriza por realizar dos tipos de apoyo (Bingisser & Jensen, 2011; Brice et al., 2011; Gaede, 1990; Gutiérrez et al., 1999; Rojas & Gutiérrez, 2009): apoyo unipodal (tabla 3) y apoyo bipodal (tabla 4).

Tabla 3. Criterios para el análisis técnico de la fase de apoyo unipodal en los giros del lanzamiento de martillo (Gaede, 1990).



Representación gráfica	Referencia	Criterio de valoración
	JKL - cabeza	Sigue al martillo, centrada
	JKL - brazos	Extendidos, pasivos
	J - martillo	Guiado lejos hacia la izquierda
	KL - martillo	Delante y en un punto alto
	JKL - tronco	Ligeramente inclinado hacia atrás
	J - pierna pivote	Activa giro sobre el talón
	J - pierna libre	Es elevada
	KL - pierna pivote	Flexionada, apoyo sobre la parte media
KL - pierna libre	Flexionada (giro activo)	

Tabla 4. Criterios para el análisis técnico de la fase de apoyo bipodal en los giros del lanzamiento de martillo (Gaede, 1990).

Representación gráfica	Referencia	Criterio de valoración
	GHI - cabeza	Sigue al martillo, centrada
	GHI - brazos	Conducen al martillo en un plano frontal
	G - martillo	Sobre la altura de la cabeza
	HI - martillo	Delante y detrás del punto más bajo
	G - tronco	Máxima rotación (hombros-cadenas)
	HI - tronco	Ligeramente inclinado atrás (centrado)
	HI - cadenas	Presión activa en dirección al giro
	G - rodillas	Flexionadas (izquierda: considerablemente, derecha: ligeramente)
	G - CM	Descendido (rodilla flexionada)
	HI - pierna pivote	Ligeramente flexionada, giro sobre el talón
HI - pierna libre	Ligeramente flexionada, giro sobre la parte media del pie	

En el apoyo unipodal, el deportista gira sobre su eje longitudinal (entendiendo este eje como un sistema de referencia del propio cuerpo y no del conjunto lanzador-artefacto) manteniendo sólo un apoyo en el suelo. La superficie del calzado que contacta con el suelo es talón-borde externo hasta el punto más alto de la bola y punta-borde interno a partir de este punto (Durán, 2000). Al igual que ocurría durante los volteos, el atleta no debe elevarse porque reduciría el momento angular del sistema lanzador-artefacto, adoptando como estrategia una posición sentada (Bingisser & Jensen, 2011). La pierna de apoyo unipodal no se flexiona durante el ascenso (Durán, 2000).

En el apoyo bipodal, los dos pies están en contacto con el suelo. La importancia de esta fase se basa en que, desde una perspectiva dinámica, resulta más fácil aplicar fuerza contra el suelo para obtener una mayor cantidad de velocidad angular del artefacto cuando los dos pies se encuentran apoyados que cuando sólo se encuentra uno (Bondartschuk, 1987; Judge, 1999; Kuznetsov, 1965; Maheras, 2009). En este sentido, sería recomendable que esta fase de doble apoyo tuviera una mayor duración en relación a la fase de apoyo simple (Bartonietz et al., 1997; Dapena, 1989b; Judge, 1999; Kuznetsov, 1965). Este aspecto se ha medido en competición apoyando esta teoría (Isele & Nixdorf, 2010; Judge et al., 2008). Esto se consigue retrasando el momento de despego del pie de la pierna libre, cuando ambos pies han girado 90°, y disminuyendo la duración de la fase de apoyo unipodal (Tschiene, 1980). Sin embargo, este posicionamiento ha sido cuestionado por Morris y Bartlett (1993). Se ha demostrado que durante la fase de apoyo unipodal también se puede incrementar la velocidad de giro del artefacto (Brice et al., 2008; Dapena, 1984; Dapena & McDonald, 1989), aunque estos incrementos en la velocidad lineal en la cabeza del martillo son menores en relación al apoyo bipodal (Dapena & McDonald, 1989). Esto se consigue mediante transferencia del momento angular: a)

con un movimiento contrario a las agujas del reloj llevando el cuerpo hacia atrás, y b) elevando los brazos produciendo un movimiento a favor de las agujas del reloj. Por otra parte, Dapena (1989a) midió la aceleración del artefacto en las fases de apoyo unipodal y apoyo bipodal, obteniendo que durante la fase de apoyo doble se produce una aceleración del artefacto y durante la fase de apoyo simple una deceleración (figura 8).

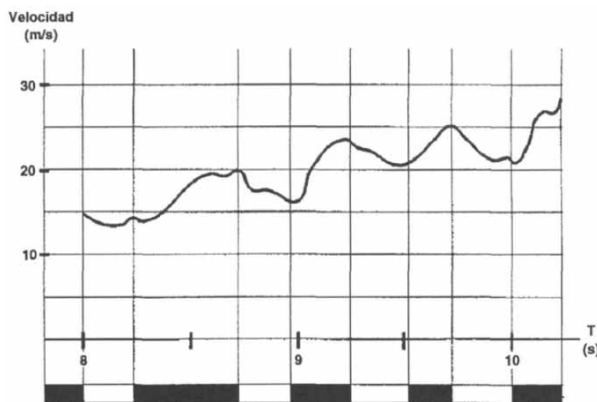


Figura 8. Curva velocidad-tiempo durante la realización de las fases de apoyo unipodal y apoyo bipodal en los giros del lanzamiento (Dapena, 1989).

Recientemente han aparecido evidencias que demuestran que a medida que se incrementa la velocidad de giro del centro de gravedad del artefacto disminuye el tiempo en el cual los pies permanecen en contacto con el suelo durante el apoyo doble (Gutiérrez et al., 2002), lo que es un aspecto a tener en cuenta. Isele y Nixdorf (2010) encuentran que la duración del apoyo doble se incrementa a medida que se avanza con los giros. También se han encontrado evidencias que durante la fase de apoyo bipodal no existe correlación entre el desplazamiento angular del martillo y el cambio de velocidad (Gutiérrez & Rojas, 2005). Por su parte, Rojas y Gutiérrez (2009) encuentran correlación entre el desplazamiento angular de la cabeza del martillo y su velocidad tangencial durante la fase del penúltimo apoyo bipodal (en el penúltimo giro).

Suelta

La fase de suelta comienza al terminar el último giro, en el apoyo bipodal, y termina justo en el momento posterior de liberar el martillo. Teniendo en cuenta el tipo de movimiento que describe el artefacto una vez que abandona las manos del lanzador (movimiento parabólico), el objetivo de esta fase es liberar el martillo con una velocidad máxima, a una elevada altura, y con un ángulo óptimo próximo a los 45° (Dapena, Gutiérrez, Soto, & Rojas, 2003; Gutiérrez & Soto, 2001). La fase de suelta es similar a la ejecución de un giro (tabla 5), sólo aparecen unas modificaciones técnicas en las acciones tras el contacto del pie derecho (Durán, 2000). El pie derecho se posiciona sobre el antepie en el momento que la cabeza del martillo está a la derecha alejada y diagonalmente abajo. A partir de este punto comienza una extensión de rodillas, caderas, espalda, y hombros, empujando fuerte con la pierna derecha (Judge, 1999; Petrov, 1980), aprovechando la transferencia de impulsos de la cadena cinética muscular (Bartonietz & Borgstöm, 1995).

Tabla 5. Criterios para el análisis técnico de la fase de suelta en el lanzamiento de martillo (Gaede, 1990).

Representación gráfica	Referencia	Criterio de valoración
	M - cabeza	Sigue al martillo, centrada
	NO - cabeza	Echada hacia atrás
	MNO - brazos	Conducen al martillo en un plano frontal
	M - tronco	Vertical (máxima torsión)
	O - tronco	Ligeramente inclinado hacia atrás
	O - caderas	Extendidas
	M - rodillas	Flexionadas
	M - rodillas	Flexionadas, derecha: parte media del pie,
	O - pierna pivote	Izquierda: punta del pie
	O - pierna libre	Extendida sobre el talón
O - lado izquierdo	Sobre la punta, ligeramente flexionada	
		bloqueo

A nivel teórico, para lograr una suelta del martillo óptima se requiere máxima y constante distancia desde la cabeza del artefacto hasta el eje de rotación, seguida de rápido acortamiento de la distancia inmediatamente previo a la suelta (Maronski, 1991). Sin embargo, este aspecto se ha

demostrado que no beneficia a la velocidad de salida. La fuerza aplicada por el lanzador a la cabeza del martillo a través del tirón del cable resulta una fuerza centrípeta que modifica el radio de giro, pero no ha mostrado variaciones estadísticamente significativas con la velocidad tangencial (Fujii & Ae, 2008; Fujii, Koyama, & Ae, 2007).

Parámetros cinemáticos de rendimiento en la fase de vuelo del artefacto

La distancia horizontal del artefacto en un lanzamiento de martillo, a diferencia del lanzamiento de jabalina o el lanzamiento de disco, no se encuentra tan influenciada por los condicionantes aerodinámicos: características físicas del artefacto, existencia de viento, ángulo de ataque, o movimiento de rotación para conseguir condiciones de estabilidad (Best, Bartlett, & Sawyer, 1995; Hubbard & Laporte, 1997; Hunter, 2005; Mizera & Horvath, 2002; Okamoto, Sakurai, & Ikegami, 2008). Este aspecto requiere en estas pruebas de complejos modelos aerodinámicos de predicción de la distancia de vuelo (formulas matemáticas) para establecer las condiciones técnicas óptimas de lanzamiento. En el caso del lanzamiento de martillo, el rendimiento (distancia horizontal) se encuentra determinado por los condicionantes cinemáticos de la suelta, estimando que el aire influye sobre el rendimiento en un 2% (Dapena et al., 2003). Se trata de tres factores críticos de los movimientos de tipoparabólico, similares a lo que se dan en la prueba de lanzamiento de peso (Allegretti et al., 2007; Bartonietz et al., 1997; Bartonietz, Hinz, Lorenz, & Lunau, 1988; Gutiérrez et al., 2002; Okamoto et al., 2008): altura de liberación del artefacto (h), ángulo de proyección (α) y velocidad resultante de salida (v).

$$D = v_o^2 / g \cdot \cos \alpha (\sqrt{\sin^2 \alpha 2 \cdot g \cdot h_o / v_o^2} \pm C)$$

- D = distancia de lanzamiento
- v_o = velocidad de salida
- α = ángulo de proyección
- h_o = altura de liberación
- C = factores relacionados con la resistencia del aire

Altura de liberación

Los lanzadores de mayor estatura liberarán el artefacto desde una mayor altura, lo que supondrá una ventaja mecánica (Erdmann, 2007). Este parámetro de rendimiento se encuentra determinado por dos factores: las características antropométricas del deportista (determinadas genéticamente) y por la posición final (determinada por la percepción del esquema corporal y por el dominio técnico de la prueba). Permaneciendo constantes el ángulo de proyección y la velocidad de salida, el incremento en la altura de liberación daría como resultado una mayor distancia horizontal de lanzamiento. Por tanto, aquellos lanzadores más altos y con mayor longitud de los segmentos tendrán unas condiciones biomecánicas favorables. Sin embargo, la realidad es que el nivel de variación porcentual en el valor de la altura de liberación para conseguir incrementos significativos en el rendimiento tendría que ser muy elevado.

Ángulo de proyección

A nivel teórico, para lograr la máxima distancia individual el martillo debería de proyectarse con un ángulo de lanzamiento de 45°. Sin embargo, a nivel práctico este valor únicamente representa valores de 40° (Gutiérrez & Soto, 1994), pudiendo llegar a 43-44° (Dapena, 1984) y registrando valores mínimos de 29° (Bartonietz, 1994). Existen cuatro factores que determinan que el ángulo en la práctica sea inferior al teórico: a) un ángulo de 45° implicaría que el martillo golpeará el suelo durante el último giro previo a la suelta del artefacto (Gutiérrez & Soto, 1993), b) depende de la inclinación del plano de movimiento de la cabeza del martillo (Okamoto et al., 2008), c) el incremento en el ángulo de lanzamiento representa menores rangos de mejora que el incremento de la velocidad de lanzamiento ante una misma variación porcentual y para un valor de altura de lanzamiento constante (Bartonietz et al., 1988; Durán, 2000), y d) el incremento del ángulo supone mayores dificultades para alcanzar elevadas velocidades de salida (Bartonietz et al., 1988). A medida que aumenta el nivel de los deportistas hay una

tendencia a que el ángulo de proyección se acerque al valor de 45° (Bartonietz et al., 1997).

Velocidad lineal de salida

Se trata de uno de los parámetros biomecánicos más determinante para el rendimiento en el lanzamiento de martillo (Bartonietz et al., 1997; Dapena, 1984; Fujii et al., 2007; Fujii et al., 2009; Jabs, 1979; Joch, 1988; Maheras, 2009; Maronski, 1991). Este parámetro ha mostrado una fuerte correlación con la distancia horizontal de lanzamiento (Isele & Nixdorf, 2010; Okamoto et al., 2008). Además, es uno sobre los que más puede influir el deportista (Bartonietz et al., 1997). Esto se debe a que el atleta no puede elegir de forma independiente el ángulo de proyección y la altura de liberación, como consecuencia de los condicionantes mecánicos del ángulo de proyección y las limitaciones antropométricas para la altura de liberación.

La velocidad lineal final del artefacto depende de los incrementos de velocidad lineal que se producen en cada giro del sistema lanzador-artefacto y que alcanza su máximo valor en el momento de soltar el artefacto (Bondartschuk, 1987). Teniendo en cuenta que el lanzamiento de martillo es un movimiento circular, donde la cabeza del martillo describe giros alrededor del eje longitudinal (coincidente con la bisectriz del sector de lanzamiento), y en función de la expresión ($v = \omega \cdot r$), se puede deducir que el incremento en la velocidad tangencial del martillo puede producirse (Hay, 1980): a) incrementando el radio de giro, b) incrementando la velocidad angular, y c) incrementando ambas a la vez. Este mecanismo de aceleración del artefacto para incrementar el rendimiento ha sido estudiado desde el punto de vista de la cinética (Bartonietz, 1994; Brice et al., 2011; Dapena & Feltner, 1989; Kobayashi & Kaneko, 1980; Maheras, 2009; Murofushi, Sakurai, Umegaki, & Takamatsu, 2007; Ohta, Umegaki, Murofushi, & Luo, 2010; Susanka, Stepanek, Miskos, & Terauds, 1986).

Para lograr una elevada velocidad de salida es necesario lograr un camino de aceleración lo más largo posible. Esto se consigue aumentando el radio de giro, lo que produce un mayor momento inercia. El radio de giro se incrementa con la posición contraria de la pelvis y la extensión de los brazos. El incremento progresivo de la velocidad se produce por un aumento de la velocidad angular en cada giro y una reducción progresiva del radio de giro. Cada giro tiene mayor recorrido y en cada giro es más alto el punto de mayor altura y más bajo el punto de menor altura (Bartonietz et al., 1988).

Valores de los parámetros cinemáticos de la fase de suelta

A continuación se expone una tabla (tabla 6) en la que se presentan valores de referencia para las variables determinantes del vuelo del artefacto y que afectan a la distancia final de lanzamiento. Estos valores provienen de estudios con lanzadores de elevado nivel de rendimiento.

Tabla 6. Valores registrados en las variables cinemáticas de suelta del lanzamiento de martillo.

Autor	Altura de liberación	Velocidad de salida	Ángulo de proyección
Allegretti et al. (2007)	1.10-1.59 m (M) 1.23-1.41 m (H)	22.05-25.27 m/s (M) 24-25 m/s (H)	35.91-40.81° (M) 36.18-40.79° (H)
Brice et al. (2011)	-	24.1 m/s (M) 23.7 m/s (H)	-
Cardenas (2003)	-	30 m/s	-
Guñérrez y Rojas (2005)	-	23.73 m/s	-
Hunter (2003)	-	25 m/s (M) 26 m/s (H)	37° (M) 36° (H)
Isele y Nixdorf (2010)	1.46 m (M)	27.1 m/s (M)	40° (M)
Judge, Hunter y Gilreath (2008)	-	25.9-27.2 m/s (M)	41-43° (M)
Okamoto, Sakurai e Ikegami (2006)	1.46-1.84 m	28.4-28.9 m/s	38.3-40°
Ueya (1992)	1.32-1.72 m	28.6-29.1 m/s	38.9-45.2°
Umegaki et al. (2009)	1.49-1.63 m	-	40.2-42°
Xie, Kong y Raynor (1998)	1.63-1.86 m	23.4-28.8 m/s	39-43°

Conclusiones

En este artículo se lleva a cabo una descripción del lanzamiento de martillo desde la perspectiva de la biomecánica, realizando un análisis

dinámico del movimiento, ya que se está relacionando la cinemática con la cinética, es decir, las fuerzas y los momentos de fuerza. A partir de lo expuesto en el documento, se puede afirmar que el lanzamiento de martillo representa una técnica deportiva compleja y que requiere, además de años de entrenamiento, elevados niveles de preparación física para conseguir excelentes resultados en competición. El rendimiento en la prueba (distancia horizontal alcanzada por el martillo) depende principalmente de variables espaciales, espacio-temporales, y angulares que se registran durante la fase de liberación del artefacto, sin embargo, es necesario que se ejecuten una serie de movimientos previos específicos para lograr unos valores óptimos en estas variables de rendimiento. Conocer los principios y las causas de los movimientos puede servir de ayuda a los entrenadores y deportistas para comprender mejor la prueba, de forma que puedan entender qué están haciendo, por qué lo están haciendo, y las posibilidades de mejorar el rendimiento a través de la optimización o modificación de la técnica. El presente artículo puede representar un escrito de referencia para todos aquellos, biomecánicos o estudiantes, interesados en el estudio de la técnica deportiva desde una perspectiva dinámica.

Referencias

- Allegretti, L., Pombo, R., Persinotti, T., Alves, J.L., & Leite, R.M. (2007). 3D kinematic analysis of the hammer throw in competitions. *Proceedings of: XXV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Ouro Preto: Brazil, pp. 314-317.
- Bartlett, R.M. (2007). *Introduction to sports biomechanics: analysing human movement patterns (2° ed.)*. New York: Taylor and Francis.
- Bartonietz, K. (1994). A biomechanical analysis of throws with different weight and length hammer. *Modern Athlete and Coach*, 32(4), 33-36.
- Bartonietz, K., Barclay, L., & Gathercole, D. (1997). Characteristics of top performances in the women's hammer throw: basics and technique of the world's best athletes. *New Studies in Athletics*, 12(2), 101-109.
- Bartonietz, K., & Borgstöm, A. (1995). The throwing event at the World Championship in Athletics 1995, Göteborg - Technique of the world's best athletes. Part 1: Shot put and hammer throw. *New Studies in Athletics*, 10(4), 43-63.
- Bartonietz, K., Hinz, L., Lorenz, D., & Lunau, G. (1988). The Hammer: The view of DVfL of the GDR on talent selection, technique and training of throwers from beginner to top level. *New Studies in Athletics*, 3(1), 39-56.
- Best, R.J., Bartlett, R.M., & Sawyer, R. A. (1995). Optimal javelin release. *Journal of Applied Biomechanics*, 11(4), 371-394.
- Bingisser, M., & Jensen, R. (2011). Teaching the hammer throw: perfecting technique. *Track Coach*, 194, 6284-6286, 6292.
- Blazevich, A. (2007). *Sport Biomechanics. The Basics: Optimizing Human Performance*. London: A&C Black.
- Bondartschuk, A.P. (1987). La técnica moderna en el lanzamiento de martillo. *Cuadernos de atletismo*, 20, 65-72.
- Brice, S., Ness, K., & Rosemond, D. (2011). An analysis of the relationship between the linear hammer speed and the thrower applied forces during the hammer throw for male and female throwers. *Sports Biomechanics*, 10(3), 174-184.
- Brice, S., Ness, K., Rosemond, D., Lyons, K., & Davis, M. (2008). Development and validation of a method to directly measure the cable force during the hammer throw. *Sports Biomechanics*, 7(2), 274-287.
- Burkett, B. (2010). *Sport mechanics for coaches. (3° ed.)*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Cardenas, H. (2003). Analysis of hammer handle performance and safety. *New Studies in Athletics*, 18(1), 47-50.
- Dapena, J. (1984). The pattern of hammer speed during a hammer throw and influence of gravity on its fluctuations. *Journal of Biomechanics*, 17(8), 553-559.
- Dapena, J. (1986). A kinematic study of center of mass motion in the hammer throw. *Journal of Biomechanics*, 19(2), 147-158.
- Dapena, J. (1989a). Some biomechanical aspects of hammer throwing. *Athletics Coach*, 23(3), 12-19.
- Dapena, J. (1989b). Influence of direction of the cable force and of the radius of the hammer path on speed fluctuations during hammer throwing. *Journal of Biomechanics*, 22(6), 565-575.
- Dapena, J., & Feltner, M. (1989). Influence of the direction of the cable force and of the radius of the hammer path on speed fluctuations

- during hammer throwing. *Journal of Biomechanics*, 22(6-7), 565-575.
- Dapena, J., Gutiérrez, M., Soto, V., & Rojas, F. (2003). Prediction of distance in hammer throwing. *Journal of Sports Sciences*, 21(1), 21-28.
- Dapena, J., & McDonald, G. (1989). A three dimensional analysis of angular momentum in the hammer throw. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 21(2), 206-220.
- Durán, J. (2000). Lanzamiento de martillo. En: J. Bravo, J. Campos, J. Durán y J.L. Martínez (ed). *Lanzamientos. Atletismo 3*, pp. 160-231. Madrid: Real Federación Española de Atletismo.
- Ecksmiedt, S., & Mecseki, A. (2000). Change the rules of hammer throwing, please!. *New Studies in Athletics*, 15(2), 33-35.
- Erdmann, W. (2007). Morphology biomechanics of track and field competitors. *Proceedings of: XXV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Ouro Preto: Brazil, pp. 19-26.
- Fujii, N., & Ae, M. (2008). Analysis of relationship between hammer head velocity and radius of curvature. *Proceedings of: XXVI Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Seoul: Korea, pp. 150.
- Fujii, H., Byun, K., Ogata, M., & Fujii, N. (2009). The contribution of lower torso, upper torso and upper limbs segmental motion to hammer head velocity during acceleration phase. *Proceedings of: XXVII Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Limerick: Ireland.
- Fuji, N., Koyama, Y., & Ae, M. (2007). Reexamination of acceleration mechanism in hammer throw. *Journal of Biomechanics*, 40(Suppl2), 622.
- Gaede, E. (1990). Modern technique analysis sheets for the throwing events Part V - The Hammer Throw. *New Studies in Athletics*, 5(1), 61-67.
- Gutiérrez, M., & Rojas, F.J. (2005). Relación entre el desplazamiento en la fase de doble apoyo y la velocidad en el lanzamiento de martillo. *Biomecánica*, 12(2), 48-53.
- Gutiérrez, M., Rojas, F.J., & Soto, V.M. (1999). *Apoyo biomecánico al rendimiento deportivo: lanzamiento atlético, carreras, relevos, natación, tenis y tiro*. Efecto del peso del martillo sobre ciertos factores biomecánicos que determinan la eficacia del lanzamiento (pp. 8-19). Investigación en Ciencias del Deporte, Número 22. CSD: Madrid.
- Gutiérrez, M., & Soto, V.M. (1993). Análisis biomecánico del lanzamiento de martillo (primera parte). *Apunts: Medicina de LÉsport*, 118(30), 275-287.
- Gutiérrez, M., & Soto, V.M. (1994). Análisis biomecánico del lanzamiento de martillo (segunda parte). *Apunts: Medicina de LÉsport*, 119(31), 47-60.
- Gutiérrez, M., & Soto, V.M. (2001). *Análisis biomecánico de los lanzamientos en atletismo*. Análisis biomecánico del lanzamiento de martillo (pp. 8-49). Investigación en Ciencias del Deporte, Número 1. CSD: Madrid.
- Gutiérrez, M., Soto, V.M., & Rojas, F.J. (2002). A biomechanical analysis of the individual techniques of the hammer throw finalists in the Seville Athletics World Championship 1999. *New Studies in Athletics*, 17(2), 15-23.
- Hay, J.G. (1980). *Biomechanique des techniques sportives*. Paris: Vigot, pp. 438-445.
- Hay, J.G. (1993). *The biomechanics of sports techniques (4th ed.)*. London: Prentice-Hall.
- Hubbard, M., & Laporte, S. (1997). Damping of javelin vibrations in flight. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(3), 269-286.
- Hunter, I. (2003). The effect of venue on the distance of a hammer throw. *XXVII Annual meeting of the American Society of Biomechanics*. Toledo, OH.
- Hunter, I. (2005). The Effect of Venue and Wind on the Distance of a Hammer Throw. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 76(3), 347-351.
- IAAF (2012). *Competition Rules 2012-2013*. International Association of Athletic Federations.
- Isele, R., & Nixdorf, E. (2010). Biomechanical analysis of the hammer throw at the 2009 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*, 25(3), 189-191.
- Jabs, R.G. (1979). Velocity in hammer throwing. *Track Technique*, 77, 2449-2450.
- Joch, W. (1988). Increase in release velocity as the main objective in the throwing events. *New Studies in Athletics*, 3(1), 35-38.
- Judge, L. (1999). Teaching the women's hammer. *Track Coach*, 148, 4713-4719.
- Judge, L.W., Hunter, I., & Gilreath, E. (2008). Using Sport Science to Improve Coaching: Case Study of Erin Gilreath American Record Holder in the Hammer Throw. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 3(4), 473-484.
- Kobayashi, K., & Kaneko, K. (1980). Mechanics of hammer throw. *Journal of health, Physical Education and Recreation*, 30, 499-503.
- Kuznetsov, V. (1965). Path and speed of the hammer in the turns. *Legkaya Atletika*, 11, 11-12.
- Laruel, B., Wilson, D., & Young, R. (2004). Hammer throw safety cages. *New Studies in Athletics*, 19(1), 47-51.
- Lee, Ch-W., Liu, G-Ch., Lin, D-Ch., & Huang, Ch. (2000). The comparison of curvature radius in different performances of hammer throw. *Proceedings of: XVIII Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Hong Kong: China.
- Maheras, A.V. (2009). Reassessing velocity generation in hammer throwing. *New Studies in Athletics*, 24(4), 71-80.
- Maronski, R. (1991). Optimal distance from the implement to the axis of rotation in hammer and discus throws. *Journal of Biomechanics*, 24(11), 999-1005.
- Mizera, F., & Horvath, G. (2002). Influence of environmental factor on shot put and hammer throw range. *Journal of Biomechanics*, 35(6), 785-796.
- Morris, C.J., & Bartlett, R.M. (1991). The biomechanics of the hammer throw, in *Report on the 1991 AAA/WAAA National Championships Volume 1—The Throws* (ed. R.M. Bartlett), British Athletic Federation: Birmingham, England.
- Morris, C.J., & Bartlett, R.M. (1993). Biomechanical Analysis of the Men's Hammer Throw. In *Biomechanical Analysis of the 1993 AAA/WAAA Championships, Volume 2. Biomechanical analysis of the Hammer Throw*.
- Murofushi, K., Sakurai, S., Umegaki, K., & Takamatsu, J. (2007). Hammer acceleration due to thrower and hammer movement patterns. *Sports Biomechanics*, 6(3), 301-314.
- Ohta, K., Umegaki, K., Murofushi, K., & Luo, Z. (2010). Analysis of hammer movement based on a parametrically excited pendulum model. *Procedia Engineering*, 2(2), 3197-3203.
- Okamoto, A., Sakurai, S., & Ikegami, Y. (2006). Influence of body weight on pulling force in hammer throw. *Proceedings of: XXIV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Salzburg: Austria, pp. 1.
- Okamoto, A., Sakurai, S., & Ikegami, Y. (2008). The initial conditions at release in hammer throw of world class top athletes. *Proceedings of: XXVI Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Seoul: Korea, pp. 659.
- Pataki, L., & Ramacsay, L. (1982). *Kladivar a Odstrediva Sila* [The Hammer Thrower and Centrifugal Force], *Atletike*, 6, 22.
- Petrov, V. (1980). Hammer throw technique and drills. *Translated excerpts from Legkaja Atletika*, Moscow, #8.
- Rius, J. (1990). Didáctica general de la iniciación atlética: propuesta para una promoción más eficaz. *Apunts: Educació Física i Esports*, 20(2), 21-30.
- Sale, D.G. (2002). Postactivation potentiation: role in human performance. *Exercise and Sport Science Review*, 30(3), 138-143.
- Rojas, F.J., & Gutiérrez, M. (2009). The relationship between angular displacement of the hammer in the double support phase and its velocity in the hammer throw. *Journal of Human Sport and Exercise*, 4(3), 254-261.
- Samozvetov, A. (1974). The acceleration of the hammer. *The Throws* (Ed. Wilt, F.), pp. 87-90. Tafnews, Los Altos, CA.
- Susanka, P., Stepanek, J., Miskos, G., & Terauds, J. (1986). Hammer-athlete relationship during the hammer throw. *Proceedings of: IV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Halifax, Nova Scotia: Canada, pp. 194-200.
- Tschien, P. (1980). Nuevos elementos en la técnica del lanzamiento de martillo. Cuadernos de Atletismo 3. (traducido de Leichtathletik, 16, 1977).
- Ueya, K. (1992). The men's throwing events. *New Studies in Athletics*, 7(1), 57-65.
- Umegaki, K., Murofushi, K., Murofushi, S., Sakurai, S., Seki, Y., & Kimura, Y. (2009). Reducing the dead zone in the hammer landing sector. *New Studies in Athletics*, 24(2), 35-41.
- Wilson, D., Guy, A., & Matrahazi, I. (2006). Hammer cage and hammer developments. *New Studies in Athletics*, 21(3), 43-49.
- Xie, W., Kong, Ch., & Raynor, A. (1998). South East Asian (SEA) games biomechanics project. *Proceedings of: VI Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*. Konstanz: Germany.