

## **Anàlisi biomecànica del llançament de martell (Primera part)\***

## **Análisis biomecánico del lanzamiento de martillo (Primera parte)\***

---

Gutiérrez Dávila, M.; Soto Hermoso, V.M.

Departamento de Educación Física y Deportiva. Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte (Granada)

---

---

### **RESUM**

Aquest treball constitueix la primera part d'un estudi en el que es realitza una anàlisi teòrica dels factors que incideixen en l'eficàcia del llançament de martell des d'un punt de vista biomecànic. El llançament de martell s'ha dividit en tres fases seqüencials: volteigs, girs i final; cadascuna d'aquestes fases depèn de múltiples factors. Els girs i la fase final han estat analitzats de forma individual, i també la seva lògica interdependència.

L'objecte d'aquest estudi ha estat valorar els criteris d'eficàcia i analitzar-los des d'un punt de vista biomecànic per tal de poder realitzar una aplicació pràctica, el qual es descriu a la segona part d'aquest informe.

#### **Paraules clau:**

Biomecànica, llançament de martell, cinematografia tridimensional.

---

### **RESUMEN**

El presente trabajo constituye la primera parte de un estudio en el cual se realiza un análisis teórico de los factores que inciden en la eficacia del lanzamiento de martillo desde un punto de vista biomecánico. El lanzamiento de martillo se ha dividido en tres fases secuenciales: volteos, giros y final; cada una de estas fases depende de múltiples factores, los giros y la fase final han sido analizados de forma individual, así como su lógica interdependencia.

El objeto de este estudio ha sido valorar los criterios de eficacia y analizarlos desde un punto de vista biomecánico con el fin de poder realizar una aplicación práctica, la cual se describe en la segunda parte de este informe.

#### **Palabras clave**

Biomecánica, lanzamiento de martillo, cinematografía tridimensional.

---

### **Introducció**

L'àmbit general d'aquest estudi se centra en l'anàlisi biomecànica del llançament de martell, amb la finalitat d'establir certs criteris d'eficàcia i comparar-ne els valors entre els llançadors d'alt nivell internacional i els nacionals.

---

### **Introducción**

El ámbito general de este estudio se centra en el análisis biomecánico del lanzamiento de martillo, con la finalidad de establecer criterios de eficacia y comparar sus valores entre los lanzadores de alto nivel internacional y los nacionales.

---

\* Aquest estudi ha estat finançat per la Secretaria General del Pla Nacional I+D a través de la Comissió Interministerial de Ciència i Tecnologia (C.I.C.Y.T.).

\* El presente estudio ha sido financiado por la Secretaría General del Plan Nacional I+D a través de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (C.I.C.Y.T.).

La complexa estructura espacial dels gest, el temps relativament llarg que s'utilitza per aconseguir la velocitat final del martell i la poca informació científica que es té sobre el llançament, fan que petites modificacions de la tècnica constitueixin les causes de diferències grans entre els llançadors.

El que és cert és que no és fàcil detectar els problemes tècnics que incideixen sobre la distància de llançament; possiblement la dificultat resideix en què, per aconseguir la velocitat màxima del martell, cal realitzar dos o tres volteigs previs i tres o quatre girs, simultanis a un desplaçament lineal del sistema llançador i martell que es complica quan el pla que defineix la trajectòria del martell canvia la seva orientació espacial en cada gir. S'ha de considerar que intentar comprendre totes aquestes connotacions tècniques observant el gest a velocitat real és una tasca àrdua i difícil quan no s'utilitzen sistemes d'anàlisi que permeten descriure el moviment des d'una perspectiva científica.

Segons l'expressió **E-1**, la distància que aconseguix el martell (D), quan no es consideren les resistències aerodinàmiques, està determinada per la velocitat del martell en l'instant que el llançador el deixa anar ( $V_f$ ), l'angle de projecció respecte al terra ( $\beta$ ) i l'altura de sortida (h).

$$(E-1) \quad D = \frac{V_f^2 \sin \beta \cos \beta + V_f \cos \beta \sqrt{(V_f \sin \beta)^2 + 2gh}}{i=1}$$

on  $V_f$  correspon a la velocitat del martell en l'instant de deixar-lo anar;  $\beta$ , l'angle de projecció; h, l'altura de sortida i g, pren el valor de 9.91.

La velocitat final del martell ( $V_f$ ) està determinada per l'increment de la velocitat durant cada volta, a un ritme de creixement que és individual per a cada llançador (Bondartschuk, 1987) i aconseguint el seu valor màxim en l'instant que el llançador el deixa anar.

El desenvolupament de l'expressió **E-1** posa de manifest que l'angle de projecció ( $\beta$ ) idoni seria de 45°, tot i que realment només s'aconsegueix un angle d'uns 40°, probablement perquè un angle més gran provocaria que el martell toqués a terra durant l'última volta.

L'altura de sortida (h) depèn de les dimensions antropomètriques del llançador i de la posició adoptada al final del llançament. Generalment, com més amunt està el martell al final del llançament, més gran serà la distància aconseguida, tot i que s'ha de considerar que en mantenir constant la velocitat i l'angle, un increment tan important com ara d'un metre en l'altura, només suposaria increments petits en la distància.

La compleja estructura espacial del gesto, el tiempo relativamente largo que se utiliza para conseguir la velocidad final del martillo y la poca información científica que se tiene sobre el lanzamiento, hacen que pequeñas modificaciones en la técnica constituyan las causas de que existan grandes diferencias entre los lanzadores.

Lo cierto es que no es fácil detectar los problemas técnicos que inciden sobre la distancia de lanzamiento, posiblemente la dificultad reside en que, para conseguir la máxima velocidad del martillo es necesario realizar dos o tres volteos previos y tres o cuatro giros, simultáneos a un desplazamiento lineal del sistema lanzador y martillo que se complica cuando el plano que define la trayectoria del martillo cambia su orientación espacial en cada giro. Se debe considerar que intentar comprender todas estas connotaciones técnicas observando el gesto a velocidad real es una tarea ardua y difícil cuando no se utilizan sistemas de análisis que permitan describir el movimiento desde una perspectiva científica.

Según la expresión **E-1**, la distancia alcanzada por el martillo (D), cuando no se consideran las resistencias aerodinámicas, está determinada por la velocidad del martillo en el instante en que el lanzador lo suelta ( $V_f$ ) el ángulo de proyección con respecto al suelo ( $\beta$ ) y la altura de salida (h).

$$(E-1) \quad D = \frac{V_f^2 \sin \beta \cos \beta + V_f \cos \beta \sqrt{(V_f \sin \beta)^2 + 2gh}}{i=1}$$

donde  $V_f$  corresponde a la velocidad del martillo en el instante de soltarlo;  $\beta$ , el ángulo de proyección; h, la altura de salida y g, toma el valor de 9.91.

La velocidad final del martillo ( $V_f$ ) está determinada por el incremento de la velocidad durante cada vuelta, a un ritmo de crecimiento que es individual para cada lanzador (Bondartschuk, 1987) y alcanzando su valor máximo en el instante en que el lanzador lo suelta.

El desarrollo de la expresión **E-1** pone de manifiesto que el ángulo de proyección ( $\beta$ ) idóneo sería de 45°, aunque realmente sólo se alcanza un ángulo de unos 40°, debido, probablemente, a que un ángulo mayor provocaría que el martillo golpeará en el suelo durante la última vuelta.

La altura de salida (h) depende de las dimensiones antropométricas del lanzador y de la posición adoptada al final del lanzamiento. Generalmente, cuanto más alto esté el martillo al final del lanzamiento, mayor será la distancia conseguida, aunque se debe de considerar que manteniendo constante la velocidad y el ángulo, un incremento tan importante como de 1 metro en la altura, sólo supondría pequeños incrementos en la distancia.

## Anàlisi temporal del llançament

Després d'aquesta exposició genèrica del llançament de martell, cal fer l'anàlisi temporal i la selecció de les fases que el determinen per tal de comprendre més bé els factors que incideixen sobre la seva eficàcia.

En observar el gest, es poden diferenciar cronològicament tres fases:

- Els volteigs**, quan es fa girar el martell entorn del llançador.
- Les voltes**, quan el martell i el llançador giren al voltant d'un eix comú.
- El final**, que comprèn un interval curt de temps des del final de l'última volta fins que es deixa anar el martell.

D'acord amb les posicions que adopta el llançador en cada volta, aquesta es pot dividir en dos períodes diferenciats clarament:

- Doble recolzament**, quan els dos peus romanen en contacte amb la terra.
- Recolzament únic**, quan el llançador gira mantenint un únic recolzament en el terra.

Històricament, s'ha dedicat una atenció especial a aquests dos períodes, basant-se en la creença general que el martell només es pot accelerar durant el període de doble recolzament i que el llançador no té la possibilitat d'influir activament sobre la velocitat del martell durant el període de recolzament únic. Aquesta creença ha estat qüestionada per Dapena (1984, 1986, 1989), el qual ha manifestat que és possible incrementar la velocitat durant el període de recolzament únic si es té en compte la influència de l'acció de la gravetat sobre el martell i el desplaçament del Centre de gravetat del sistema llançador més el martell (Cgs.).

Des del punt de vista de la trajectòria del martell respecte a un sistema de referència inercial, el llançament esdevé un moviment força complex, compost per la suma de tres moviments diferents (Dapena, 1984, 1986):

- Un moviment circular del martell i del llançador al voltant d'un eix comú.
- Un canvi gradual en la inclinació del pla que descriu la trajectòria del martell en cada volta.
- Una translació horitzontal de tot el sistema, llançador més martell, a través del cercle de llançament.

## Radi de gir del martell

Tenint en compte el moviment circular del sistema llançador més martell, per poder aconseguir una certa quantitat de gir o Moment Angular (H) cal aplicar un Moment de força. Aquest Moment produeix una trajectòria circular, tant del martell com del llançador, i una força interna del sistema que es tra-

## Análisis temporal del lanzamiento

Después de esta exposición genérica del lanzamiento de martillo es necesario hacer el análisis temporal y selección de las fases que lo determinan, con el fin de comprender mejor los factores que inciden sobre su eficacia.

Observando el gesto se pueden diferenciar cronológicamente tres fases:

- Los volteos**, cuando se hace girar el martillo en torno al lanzador.
- Las vueltas**, cuando el martillo y lanzador giran alrededor de un eje común.
- El final**, que comprende un corto intervalo de tiempo desde el final de la última vuelta hasta que se suelta el martillo.

Atendiendo a las posiciones que adopta el lanzador en cada vuelta, ésta se puede dividir en dos periodos claramente diferenciados:

- Doble apoyo**, donde los dos pies permanecen en contacto con el suelo.
- Apoyo único**, donde el lanzador gira manteniendo un solo apoyo en el suelo.

Históricamente se ha dedicado una especial atención a estos dos períodos, basándose en la creencia general de que el martillo sólo puede acelerarse durante el período de doble apoyo, no teniendo el lanzador posibilidad de influir activamente sobre la velocidad del martillo durante el período de apoyo único. Esta creencia ha sido cuestionada por Dapena (1984, 1986, 1989), el cual ha puesto de manifiesto que es posible incrementar la velocidad durante el período de apoyo único si se tiene en cuenta la influencia de la acción de la gravedad sobre el martillo y el desplazamiento del Centro de gravedad del sistema lanzador más martillo (Cgs.).

Desde el punto de vista de la trayectoria del martillo con respecto a un sistema de referencia inercial, el lanzamiento supone un movimiento bastante complejo, compuesto por la suma de tres movimientos distintos (Dapena, 1984, 1986):

- Un movimiento circular del martillo y el lanzador alrededor de un eje común.
- Un cambio gradual en la inclinación del plano que describe la trayectoria del martillo en cada vuelta.
- Una traslación horizontal de todo el sistema, lanzador más martillo, a través del círculo de lanzamiento.

## Radio de giro del martillo

Atendiendo al movimiento circular del sistema lanzador más martillo, para poder conseguir una cierta cantidad de giro o Momento Angular (H) es necesario aplicar un Momento de fuerza. Dicho Momento produce una trayectoria circular, tanto del martillo como del lanzador, y una fuerza interna del

dueix en l'esforç que el llançador ha d'exercir sobre el martell com a conseqüència de la força centrípeta ( $F_{CP}$ ); és a dir, una força que va cap al centre de la trajectòria circular que segueix la bola, i per reacció, el cable tira endavant les mans del llançador amb una força igual i de sentit contrari ( $F_R$ ). Aquesta força pot assolir valors que s'acosten als 3000 N. en llançadors d'alt nivell (Dapena, 1986).

D'acord amb el diagrama de forces que es presenta a la Figura 1,a, podríem esperar que el llançador resistís empenyent cap endavant amb els peus contra el terra, però això no succeeix així en el llançament de martell, ja que el llançador també gira en el mateix sentit, i constitueixen dues masses (llançador i martell) que giren a través d'un eix comú.

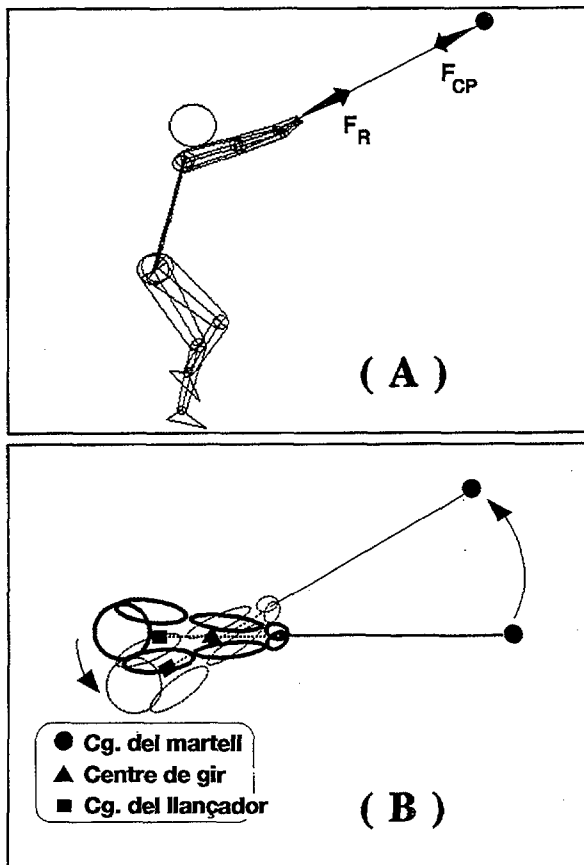


Figura 1. Diagrama de forces del llançador.  
Figura 1. Diagrama de fuerzas del lanzador.

En aquest sentit, la força que exerceix el cable sobre la bola, serveix per mantenir el martell en la seva trajectòria circular i, de la mateixa forma, la força de reacció exercida sobre les mans del llançador no fa que el llançador caigui cap endavant; sinó que simplement manté el llançador en la seva pròpia trajectòria circular (Figura 1,b).

sistema que se tradueix en el esforç que el llançador té que exercir sobre el martell debido a la fuerza centrípeta ( $F_{CP}$ ); es decir, una fuerza que se dirige hacia el centro de la trayectoria circular que sigue la bola, y por reacción, el cable tira hacia adelante de las manos del lanzador con una fuerza igual y de sentido contrario ( $F_R$ ). Esta fuerza puede alcanzar valores que se aproximan a los 3000 N. en lanzadores de alto nivel (Dapena, 1986).

Considerando el diagrama de fuerzas que se presenta en la Figura 1,a, podríamos esperar que el lanzador resistiese empujando hacia adelante con los pies contra el suelo, pero esto no ocurre así en el lanzamiento de martillo, ya que el lanzador también gira en el mismo sentido, constituyendo dos masas (lanzador y martillo) que giran a través de un eje común.

En este sentido, la fuerza ejercida sobre la bola por el cable, sirve para mantener al martillo en su trayectoria circular y de la misma forma, la fuerza de reacción ejercida sobre las manos del lanzador no hace que el lanzador se caiga hacia adelante; sino que simplemente mantiene al lanzador en su propia trayectoria circular (Figura 1,b).

En la Figura 2 se representa un esquema del sistema lanzador más martillo, donde el lanzador posee una masa ( $m_1$ ), un radio de giro de su Cg con respecto al Centro de giro del sistema ( $r_1$ ) y una velocidad tangencial de su Cg ( $V_1$ ) y el martillo con una masa  $m_2$ , un radio de giro ( $r_2$ ) y una velocidad tangencial ( $V_2$ ). Considerando que no existen fuerzas externas al sistema en movimiento circular, se podría establecer la igualdad de momentos referida en la expresión E-2, donde el Momento Angular se expresa como una relación directa a la masa y el producto vectorial correspondiente al radio de giro y el vector velocidad del Cg, tanto del lanzador como del martillo, respectivamente.

(E-2)

$$m_1 \cdot (r_1 \times v_1) = m_2 \cdot (r_2 \times v_2)$$

donde  $m_1$  y  $m_2$  corresponden a las masas del lanzador y martillo, respectivamente,  $r_1$  y  $r_2$  al radio de giro del lanzador y martillo, respectivamente y  $v_1$  y  $v_2$ , al vector velocidad tangencial el Cg. del lanzador u martillo, respectivamente.

Se considera que la masa del martillo es constante y que sería muy conveniente obtener una gran área de barrido del martillo, expresada por ( $r_2 \times v_2$ ), cuanto mayor sea la masa del lanzador, el valor de ( $r_2 \times v_2$ ) se incrementará de forma proporcional, lo que supondría aumentar, tanto el radio del martillo como su velocidad tangencial, manteniendo el mismo Momento Angular, o lo que es igual, realizando el mismo esfuerzo. Esto mismo ocurre cuando los entrenadores utilizan martillos de menor peso que el reglamentario para buscar una mayor velocidad del martillo.

En la Figura 2 es representa un esquema del sistema llançador més martell, en el qual el llançador posseeix una massa ( $m_1$ ), un radi de gir del seu Cg, respecte al Centre de gir del sistema ( $r_1$ ) i una velocitat tangencial del seu Cg. ( $V_1$ ) i el martell amb una massa ( $m_2$ ), un radi de gir ( $r_2$ ) i una velocitat tangencial ( $V_2$ ). Tenint present que no existeixen forces externes al sistema en moviment circular, es podria establir la igualtat de moments referida en l'expressió E-2, en la que el Moment Angular s'expressa com una relació directa a la massa i el producte vectorial corresponent al radi de gir i el vector velocitat del Cg., tant del llançador com del martell, respectivament.

(E-2)

$$m_1 * (r_1 \times v_1) = m_2 * (r_2 * (r_2 \times v_2))$$

on  $m_1$  i  $m_2$  corresponen a les masses del llançadors i del martell, respectivament,  $r_1$  i  $r_2$  al radi de gir del llançador i martell, respectivament,  $v_1$  i  $v_2$  al vector velocitat tangencial del Cg. del llançador o del martell, respectivament.

Si es considera que la massa del martell és constant, i que fóra convenient obtenir una gran àrea d'escombrada del martell, expressada per  $(r_2 \times v_2)$ , com més gran sigui la massa del llançador, el valor de  $(r_2 \times v_2)$  s'incrementarà de manera proporcional, la qual cosa suposaria augmentar tant el radi del martell com la seva velocitat tangencial mantenint el mateix Moment Angular, o el que és igual, realitzant el mateix esforç. Això mateix succeeix quan els entrenadors utilitzen martells de pes menor que el reglamentari per buscar una velocitat més gran del martell.

D'acord amb Hay (1980), quan es considera el moviment circular del martell des d'un punt de vista purament cinemàtic, i en utilitzar l'expressió E-3, es desprèn que el major increment de la velocitat tangencial succeeix quan s'incrementa tant la velocitat angular com el radi de gir. En aquest sentit, caldrà girar molt ràpid però també amb un radi de gir considerable, la qual cosa constitueix el compromís bàsic de la tècnica d'aquest llançament.

(E-3)

$$v = w * r$$

on  $v$  correspon a la velocitat tangencial;  $w$ , a la velocitat angular, i  $r$ , al radi de gir del martell.

## Període de doble i únic recolzament

Sembla normal que, durant dècades, els entrenadors hagin buscat perllongat el període de doble recolzament i, sobretot, després dels canvis tècnics proposats per Bondartschuk (1979, 1987), als

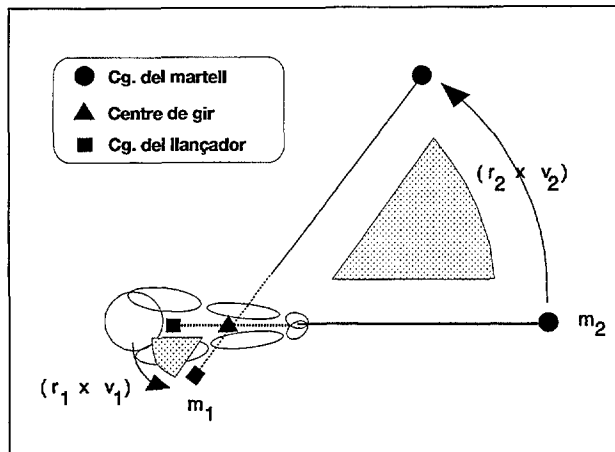


Figura 2. Representació esquemàtica del sistema llançador i martell en una rotació a través de l'eix vertical.

Figura 2. Representació esquemàtica del sistema llançador y martillo en una rotación a través del eje vertical.

Seguendo a Hay (1980), cuando se considera el movimiento circular del martillo desde un punto de vista puramente cinemático y utilizando la expresión E-3, se desprende que el mayor incremento de la velocidad tangencial ocurre cuando se incrementa, tanto la velocidad angular como el radio de giro. En este sentido será necesario girar muy rápido pero también con un considerable radio de giro, lo que constituye el compromiso básico de la técnica de este lanzamiento.

(E-3)

$$v = w * r$$

donde  $v$  corresponde a la velocidad tangencial,  $w$ , la velocidad angular y  $r$ , el radio de giro del martillo.

## Período de doble y único apoyo

Parece normal que, durante décadas, los entrenadores hayan buscado prolongar el período de doble apoyo y, sobre todo, después de los cambios técnicos propuestos por Bondartschuk (1979, 1987), a los cuales se les debe gran parte de los excelentes resultados obtenidos por los lanzadores soviéticos en las últimas dos décadas.

Lo cierto es que la lógica utilizada para hacer la propuesta de incrementar el período de doble apoyo es muy simple. Cuando se pretende incrementar la velocidad angular del martillo a través de un eje vertical es más fácil hacerlo cuando los dos pies están en contacto con el suelo que cuando se está en un solo apoyo, ya que cuando se reduce la posi-

quals es deu gran part dels excel·lents resultats obtinguts pels llançadors soviètics en les dues últimes dècades.

El cert és que la lògica utilitzada per fer la proposta d'incrementar el període de doble recolzament és molt simple. Quan es pretén incrementar la velocitat angular del martell a través d'un eix vertical és més fàcil fer-ho quan els dos peus estan en contacte amb el terra que no pas quan es té un únic recolzament, ja que quan es redueix la possibilitat d'aplicar forces contra el terra i es vol accelerar el martell, el cos del llançador gira en sentit contrari per tal de mantenir constant el Moment Angular de tot el sistema.

Com a conclusió d'aquesta lògica, els investigadors soviètics proposen que a cada volta cal tenir un període de recolzament doble de gran durada, i per això s'ha de reduir al mínim la durada del període de recolzament simple en cada volta, la qual cosa es reforça, aparentment, amb les gràfiques de velocitat del martell obtingudes mitjançant tècniques cinematogràfiques (Kuznetsov, 1985; Dapena, 1984, 1989 i Bondartschuk, 1987) on s'observen unes fluctuacions de la velocitat molt marcades a cada volta, i només s'acceleren en el període de doble recolzament.

Durant diverses dècades, s'han utilitzat dos elements tècnics importants per augmentar al màxim el període de doble recolzament:

- El peu dret (per a llançadors dretans) ha d'enlairar-se el més tard possible, pràcticament quan ambdós peus han girat un  $90^\circ$  cap a l'esquerra (Tschiene, 1980).
- El peu dret ha de col·locar-se en el terra el més aviat possible, i girar ràpidament amb la part inferior del cos del llançador.

Basant-se en aquesta mateixa lògica, el llançador Iuri Sedykh (Bondartschuk, 1987) va introduir certs canvis en la seva tècnica que li van permetre d'augmentar el període de doble recolzament i no influir negativament sobre el martell durant el període de recolzament simple. Per augmentar el període de recolzament doble, el peu dret s'hauria d'anticipar amb una orientació pròxima a la posició que manté el martell en aquest instant, i evitar el gir total del maluc, la qual cosa en comptes de beneficiar la velocitat del martell durant el període de doble recolzament, produeix una deformació en la seva trajectòria normal, i també un escurçament del radi de gir i, en conseqüència, una disminució de la velocitat.

Aquest canvi en la tècnica es pot descriure utilitzant el concepte d'**Angle Azimutal** introduït per Samozvetov (1971), en el que el llançament s'observa des d'una perspectiva superior, amb una circumferència graduada on els  $180^\circ$  coincideixen amb la pretesa direcció de llançament (Figura 3). En aquest cas, el peu dret s'orienta, en el seu recolzament inicial, cap als  $270^\circ$ , i posteriorment gira fins a situar-se amb una orientació propera als  $0^\circ$ . Realment, aquest canvi feia que l'espai recorregut pel martell

de aplicar forces contra el sòl i se vol accelerar el martell, el cos del llançador gira en sentit contrari amb el fin de mantenir constant el Moment Angular de tot el sistema.

Com a conclusió de esta lògica, los investigadores soviéticos proponen que es necesario tener en cada vuelta un período de apoyo doble de gran duración, y para eso hay que reducir al mínimo la duración del período de apoyo simple en cada vuelta, lo que se refuerza, aparentemente, con las gráficas de velocidad del martillo obtenidas mediante técnicas cinematográficas (Kuznetsov, 1985; Dapena, 1984, 1989 y Bondartschuk, 1987) donde se observan unas fluctuaciones de la velocidad muy marcadas en cada vuelta, acelerándose sólo en el período de doble apoyo.

Durante varias décadas se han utilizado dos elementos técnicos importantes para aumentar al máximo el período de doble apoyo:

- El pie derecho (para lanzadores diestros) debe de despegar lo más tarde posible, prácticamente cuando ambos pies han girado unos  $90^\circ$  hacia la izquierda (Tschiene, 1980).
- El pie derecho debe colocarse en el suelo lo antes posible, girando rápidamente con la parte inferior del cuerpo del lanzador.

Basándose en esta misma lógica el lanzador Yuri Sedykh (Bondartschuk, 1987) introdujo ciertos cambios en su técnica que le permitieron aumentar el período de doble apoyo y no influir negativamente sobre el martillo durante el período de apoyo simple. Para aumentar el período de apoyo doble, el pie derecho se debería anticipar con una orientación próxima a la posición que mantiene el martillo en ese instante, evitando el giro total de la cadera, lo que lejos de beneficiar a la velocidad del martillo

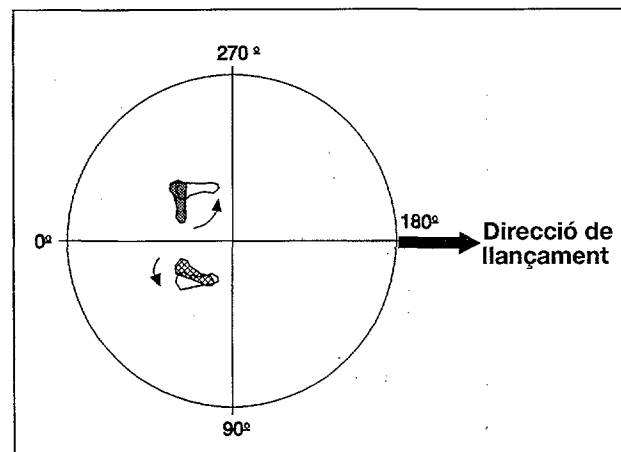


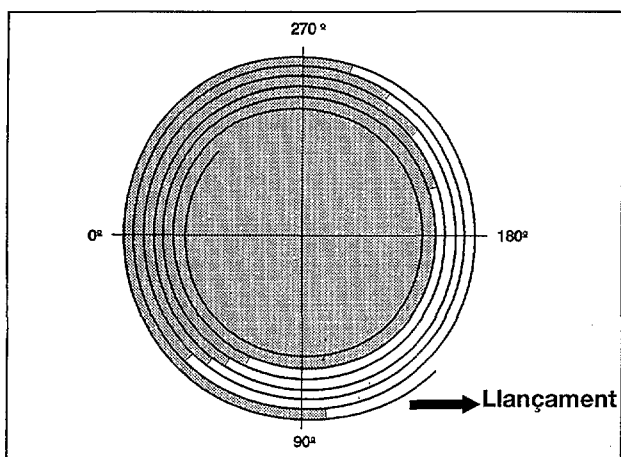
Figura 3. Descripción gráfica de l'angle azimutal proposat per Samozvetov.

Figura 3. Descripción gráfica del ángulo azimutal propuesto por Samozvetov.

en termes d'angles azimuthals, s'incrementés, la qual cosa pressuposava una millora en la tècnica.

Per no influir negativament sobre el martell durant la fase de recolzament únic, Bondartschuk (1979) va introduir un altre canvi en la tècnica d'Iuri Sedykh, mitjançant el qual el llançador hauria de precedir el martell fins que aquest aconseguís el punt més alt de la seva trajectòria, i després anticipar-se ràpidament. Aquest aspecte tècnic és tan important que, en paraules de Bondartschuk (1987), el nivell tècnic d'un llançador disminueix en relació a la desacceleració produïda al martell durant la fase de recolzament simple.

En la Figura 4 s'observa un esquema on es representa el desplaçament del martell sobre l'angle azimuthal en els períodes de doble recolzament per a cada volta, utilitzant les dades obtingudes per Dapena (1983) per a llançaments d'entre 65.5 m i 80.46 m. Com s'observa, la tendència en cada volta és reduir el temps de doble recolzament, tot i que per als millors llançadors aquesta reducció no ha de ser massa gran.



**Figura 4.** Desplaçament del martell sobre l'angle azimuthal durant els períodes de recolzament doble per a cada volta, utilitzant les dades obtingudes per J. Dapena (1983).

**Figura 4.** Desplazamiento del martillo sobre el ángulo azimuthal durante los períodos de apoyo doble para cada vuelta, utilizando los datos obtenidos por J. Dapena (1983).

## Canvi en la inclinació del pla que defineix la trajectòria del martell en cada volta

La visió sobre un angle azimuthal de la trajectòria del martell ens mostra una rotació al voltant d'un eix vertical en sentit contrari a les agulles del rellotge. D'altra banda, com que el pla del moviment del martell és inclinat, en una visió frontal, també apareix una rotació del martell al voltant d'un eix horitzontal i en sentit contrari a les agulles del rellotge.

durante el período de doble apoyo, produce una deformación en su trayectoria normal, así como un acortamiento del radio de giro y, consecuentemente, una disminución de la velocidad.

Dicho cambio en la técnica se puede describir utilizando el concepto de **Ángulo Azimutal** introducido por Samozvetov (1971), donde el lanzamiento se observa desde una perspectiva superior, con una circunferencia graduada donde los 180° coinciden con la pretendida dirección de lanzamiento (Figura 3). En este caso el pie derecho se orienta, en su apoyo inicial, hacia los 270°, girando posteriormente hasta situarse con una orientación próxima a los 0°. Realmente dicho cambio hacia que el espacio recorrido por el martillo, en términos de ángulos azimuthales, se incrementará, lo que suponía una mejora en la técnica.

Para no influir negativament sobre el martillo durante la fase de apoyo único, Bondartschuk (1979) introdujo otro cambio en la técnica de Yuri Sedykh, mediante el cual el lanzador debería preceder al martillo hasta que éste alcanzara el punto más alto de su trayectoria, para después anticiparse rápidamente. Tan importante es este aspecto técnico que, en palabras de Bondartschuk, (1987), el nivel técnico de un lanzador disminuye en relación a la desacceleración producida al martillo durante la fase de apoyo simple.

En la Figura 4 se observa un esquema donde se representa el desplazamiento del martillo sobre el ángulo azimuthal en los períodos de doble apoyo para cada vuelta, utilizando los datos obtenidos por Dapena (1983) para lanzamientos comprendidos entre 65.5 m y 80.46 m. Como se observa, la tendencia en cada vuelta es reducir el tiempo de doble apoyo, aunque para los mejores lanzadores esta reducción no debe ser demasiado grande.

## Cambio en la inclinación del plano que define la trayectoria del martillo en cada vuelta

La visión sobre un ángulo azimuthal de la trayectoria del martillo nos muestra una rotación alrededor de un eje vertical en sentido contrario a las agujas del reloj. Por otro lado, como el plano del movimiento del martillo está inclinado, en una visión frontal, también aparece una rotación del martillo alrededor de un eje horizontal y en sentido contrario a las agujas del reloj.

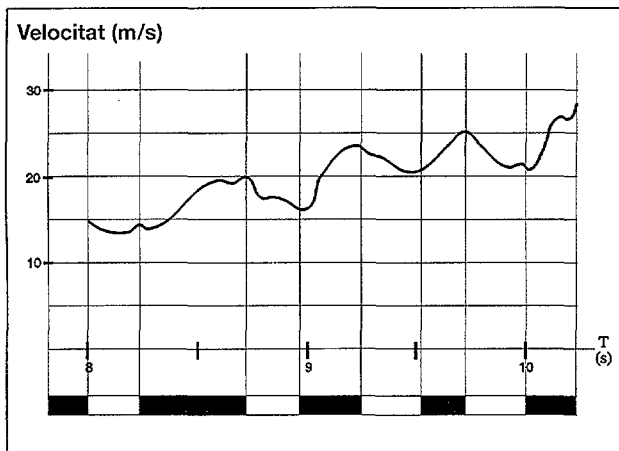
En la figura 5 se observa la localización, sobre el ángulo azimuthal del punto alto y bajo del martillo, así como el período de doble apoyo y apoyo simple, según los datos ofrecidos por Dapena (1986) sobre 16 lanzadores de alto nivel. Según el lugar donde se localizan dichos puntos sobre el ángulo azimuthal, durante el período de doble apoyo, el martillo está descendiendo durante un trayecto relativamente largo para después ascender durante un trayecto rela-

En la Figura 5 s'observa la localització, sobre l'angle azimutal del punt alt i baix del martell, així com també el període de doble recolzament i recolzament simple, segons les dades ofertes per Dapena (1986) sobre 16 llançadors d'alt nivell. Segons el lloc on es localitzen aquests punts sobre l'angle azimutal, durant el període de doble recolzament, el martell baixa durant un trajecte relativament llarg i després puja durant un trajecte relativament curt, mentre que durant el període de recolzament únic, succeeix tot el contrari, és a dir, puja durant un període relativament llarg i baixa durant un període relativament curt.

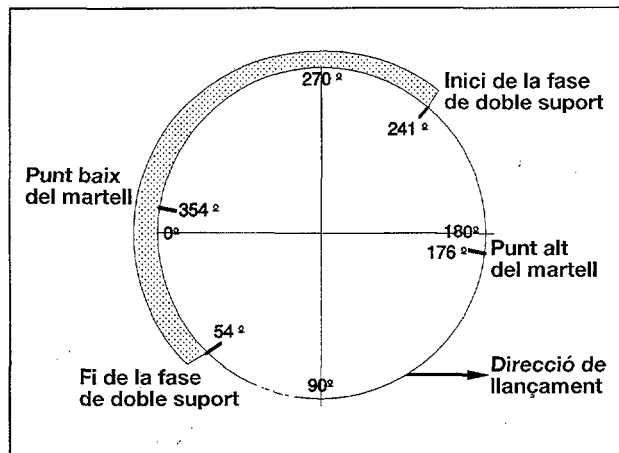
El fet que existeix un moviment circular al voltant de l'eix vertical i un altre a través de l'eix horitzontal significa que, per augmentar la velocitat del martell, cal aplicar un Moment de força al voltant d'un eix vertical, però també cal un moment de força al voltant d'un eix horitzontal, fet que, com veurem més endavant, constitueix un element tècnic d'especial rellevància.

### Canvis en la velocitat del martell durant cada volta

Seguint amb el plantejament relatiu a les possibilitats que es tenen per accelerar el martell, com s'ha dit, el llançador necessita crear dos moments de força, un sobre l'eix vertical i un altre sobre l'horitzontal. Si s'observa en la Figura 6 la gràfica general de velocitat del martell, adaptada de Kuznetsov (1985) i les seves dades confirmades tant per Bondartschuk (1987) com per Dapena (1989), es pot comprovar que la velocitat augmenta només durant el període de doble recolzament, mentre que durant el període de recolzament únic aquest increment no existeix.



**Figura 6.** Gràfica general de la velocitat del martell adaptada per J. Dapena (1989).  
**Figura 6.** Gràfica general de la velocidad del martillo adaptada por J. Dapena (1989).



**Figura 5.** Localització del punt baix i del punt alt del martell en relació al període de recolzament doble i únic, utilitzant l'angle azimutal.  
**Figura 5.** Localización del punto bajo y del punto alto del martillo en relación al período de apoyo doble i único, utilizando el ángulo azimutal.

tivamente corto, mientras que durante el período de apoyo único, ocurre todo lo contrario, asciende durante un período relativamente largo y desciende durante un período relativamente corto.

El hecho de que exista un movimiento circular alrededor del eje vertical y otro a través del eje horizontal significa que, para aumentar la velocidad del martillo, se necesita aplicar un Momento de fuerza alrededor de un eje vertical, pero también se necesita un momento de fuerza alrededor de un eje horizontal, hecho que, como veremos más adelante, constituye un elemento técnico de especial relevancia.

### Cambios en la velocidad del martillo durante cada vuelta

Si siguiendo con el planteamiento relativo a las posibilidades que se tienen para acelerar el martillo, como se ha dicho, el lanzador necesita crear dos momentos de fuerza, uno sobre el eje vertical y otro sobre el horizontal. Si se observa en la Figura 6 la gráfica general de velocidad del martillo, adaptada de Kuznetsov (1985) y confirmados sus datos tanto por Bondartschuk (1987) como por Dapena (1989), se puede comprobar que la velocidad aumenta sólo durante el período de doble apoyo, mientras que durante el período de apoyo único ese incremento no existe.

Aunque no cabe duda de que existan fluctuaciones en la gráfica de la velocidad del martillo en cada giro, Dapena (1989) se cuestiona que la única causa de la aceleración y desaceleración del martillo sea el hecho de estar en doble apoyo o apoyo simple, res-





l'expressió **E-4**, on  $m_i$  correspon a la massa de cadascun dels quinze segments i ( $r_i \times v_i$ ) el producte vectorial del radi de gir de cada segment ( $r_i$ ) i el vector velocitat del Cg. de cada segment ( $v_i$ ), de Dapena i MacDonald (1989) expressen com al producte de la massa pel ritme d'àrea de cada segment.

(E-4)

$$H = \sum_{i=1}^{i=15} m_i \cdot (r_i \times v_i)$$

on H correspond al Moment Angular del sistema llançador i martell, sense considerar el factor local o propi del gir de cada segment,  $m_i$  la massa de cada segment,  $r_i$  el radi de gir i  $v_i$ , el vector velocitat tangencial el Cg. de cada segment.

Per descriure com el llançador accelera el martell utilitzant el Moment angular del sistema, procedent de l'aplicació de cert Moment de força, considerem que tant en la Figura 7,a com en la Figura 7,b el valor del Moment Angular a través d'un eix horitzontal és el mateix i que no actuen forces externes al sistema. Amb aquesta situació, en la Figura 7,a es representa un esquema del Moment Angular produït per un Moment de Força contrari a les agulles del rellotge, al voltant de l'eix horitzontal, així com també el ritme d'àrea, en aquest sentit, descrit pel Cg. del martell respecte al centre de gir del Sistema llançador més martell, en una situació en la que tots els segments continuen en la mateixa posició.

Per contra, en la Figura 7,b el llançador ha realitzat un moviment cap amunt dels braços i del martell, provocant una **transferència del Moment Angular** del llançador al martell, i fent que aquest incrementi el seu ritme d'àrea i disminuint el desplaçament del llançador, podent arribar a fer-se negatiu (desplaçament a favor de les agulles del rellotge). En aquesta situació, el sumatori dels Moments angulars segmentaria es manté constant, però el martell s'ha accelerat cap amunt. Una mica semblant a quan perdem l'equilibri cap enrere i girem els braços en aquest sentit per no caure.

Segons el que hem exposat, és rellevant que el llançador generi uns Moments de força importants a través de l'eix horitzontal per tal de després poder transferir el Moment angular resultant al martell. La qüestió és saber com el llançador crea aquests Moments de força, tant en doble recolzament com en recolzament únic.

Per poder descriure com es crea el moment de Força en recolzament únic, cal recórrer a la Figura 8, en la que s'observa el diagrama de forces que apareixen quan el llançador està en recolzament simple. En aquest cas, el Moment de forces contrari a les agulles del rellotge apareix automàticament. La línia d'aplicació de la Força Normal (G), cau fora de la base de sustentació i la línia d'aplicació del component vertical de la força de reacció amb la que el

del Cg. de cada segment ( $v_i$ ), lo que Dapena & McDonald (1989) expressa como el producto de la masa por el ritmo de área de cada segmento.

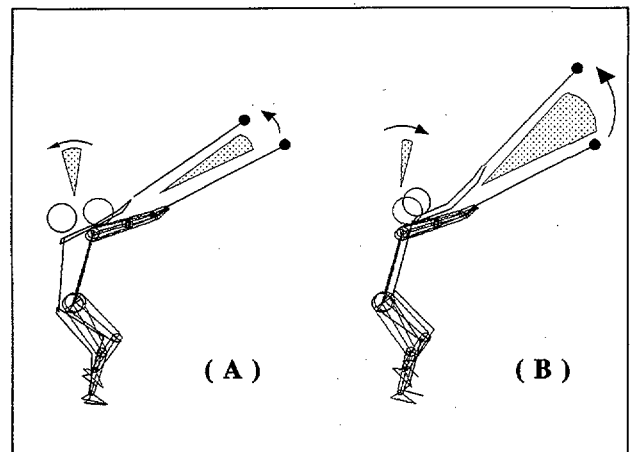
(E-4)

$$H = \sum_{i=1}^{i=15} m_i \cdot (r_i \times v_i)$$

donde H corresponde al Momento Angular del sistema lanzador y martillo, sin considerar el factor local o propio del giro de cada segmento,  $m_i$  la masa de cada segmento,  $r_i$  el radio de giro y  $v_i$ , el vector velocidad tangencial el Cg. de cada segmento.

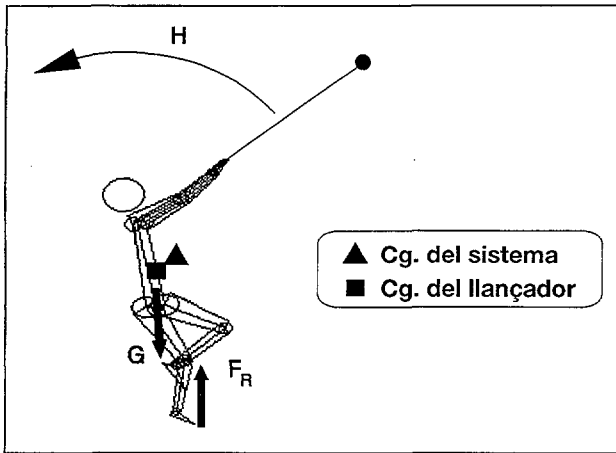
Para describir como el lanzador acelera el martillo utilizando el Momento angular del sistema, procedente de la aplicación de Cierta Momento de fuerza, consideremos que tanto en la Figura 7,a como en la Figura 7,b el valor del Momento Angular a través de un eje horizontal es el mismo y que no actúan fuerzas externas al sistema. Con esta situación, en la Figura 7,a se representa un esquema del Momento Angular producido por un Momento de Fuerza contrario a las agujas del reloj, alrededor del eje horizontal, así como el ritmo de área, en este mismo sentido, descrita por el Cg. del martillo con respecto al centro de giro del Sistema lanzador más martillo, en una situación en la que todos los segmentos permanecen en la misma posición.

Por el contrario, en la Figura 7, b el lanzador ha realizado un movimiento hacia arriba de sus brazos y martillo, provocando una **transferencia del Momento Angular** del lanzador al martillo, haciendo que éste incremente su ritmo de área, y disminuyendo el desplazamiento del lanzador, pudiendo llegar a hacerse negativo (desplazamiento a favor de las agujas del reloj). En esta situación el sumatorio



**Figura 7.** Descripció gràfica de la transferència del Moment Angular del sistema al matell.

**Figura 7.** Descripción gráfica de la transferencia del Momento Angular del sistema al martillo.



**Figura 8.** Diagrama de forces quan el llançador està en recolzament únic.

**Figura 8.** Diagrama de fuerzas cuando el lanzador está en apoyo único.

terra empeny cap amunt el llançador ( $F_r$ ) no passa pel Cg. del sistema, i així es produeix un Moment de força sobre el sistema llançador més martell contrari a les agulles del rellotge que provocaria una caiguda del llançador en aquest mateix sentit, tot i que això no succeeix realment. La raó és que el llançador transfereix el seu Moment Angular al martell i incrementa així el seu ritme d'àrea, és a dir, la major part del sumatori de les àrees segmentàries la produeix el martell i no els segments associats al llançador. Aquest fet fa que s'incrementi la velocitat del martell a través de l'eix horitzontal en recolzament únic i no pot succeir quan el llançador s'ocupa d'avançar precipitadament el martell en recolzament únic.

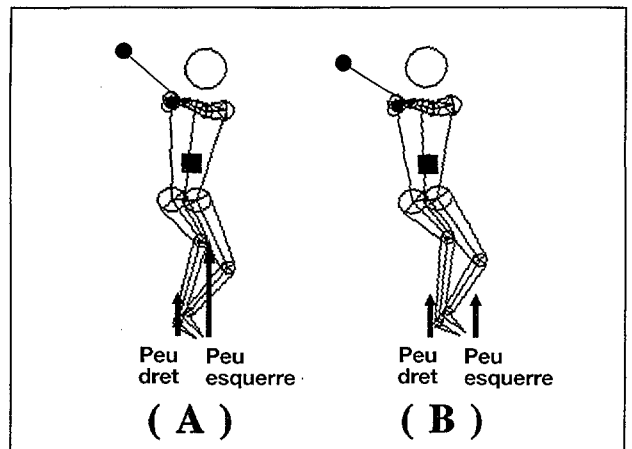
Fins aquí la forma de produir Moment de Força i com s'incrementa la velocitat del martell al voltant de l'eix horitzontal durant el període de recolzament simple, però durant la fase de recolzament doble també es pot incrementar la velocitat angular del martell a través de l'eix horitzontal. Segons la teorització que realitzen Dapena i MacDonald (1989) sobre aquesta qüestió, això podria succeir de dues maneres diferents: a) podria aconseguir-se en aplicar més força de component vertical contra el terra amb el peu esquerre que amb el dret, la qual cosa fa que el component vertical de la força es desplaci cap un costat del Cg. del Sistema llançador més martell (Figura 9,a), i b) en fer que la força vertical resultant que el terra exerceix com a reacció a l'exercida pels dos peus sigui el més excèntrica possible i desplaci el Centre de gravetat del sistema (Cgs.) més a prop de la vertical del recolzament del peu dret que del peu esquerre (Figura 9,b).

Com es desprèn del que hem exposat, i essent cauts en les valoracions, podem concloure que, tot i que és possible que la velocitat del martell al vol-

de los Momentos Angulares segmentarios se mantiene constante, pero el martillo se ha acelerado hacia arriba. Algo parecido a cuando perdemos el equilibrio hacia atrás y giramos los brazos en este mismo sentido para no caer.

Según lo expuesto, es relevante que el lanzador genere unos Momentos de fuerza importantes a través del eje horizontal para después poder transferir el Momento angular resultante al martillo. La cuestión es saber cómo crea el lanzador estos Momentos de fuerza, tanto en doble apoyo como en apoyo único.

Para poder describir como se crea el Momento de Fuerza en apoyo único, es necesario recurrir a la Figura 8, donde se observa el diagrama de las fuerzas que aparecen cuando el lanzador está en apoyo simple. En este caso, el Momento de fuerzas contrario a las agujas del reloj aparece automáticamente. La línea de aplicación de la Fuerza Normal (G), cae fuera de la base de sustentación y la línea de aplicación de la componente vertical de la fuerza de reacción con la que el suelo empuja hacia arriba el lanzador ( $F_r$ ) no pasa por el Cg. del sistema, produciéndose un Momento de fuerza sobre el sistema lanzador más martillo contrario a las agujas del reloj que provocaría una caída del lanzador en este mismo sentido, aunque esto no ocurre realmente, la razón es que el lanzador transfiere su Momento Angular al martillo incrementando su ritmo de área, es decir, la mayor parte del sumatorio de las áreas segmentarias la produce el martillo y no los segmentos asociados al lanzador. Este hecho hace que se incremente la velocidad del martillo a través del eje horizontal en apoyo único y no puede ocurrir cuando el lanzador se ocupa de adelantar precipitadamente al martillo en apoyo único.



**Figura 9.** Diagrama de forces teòric quan el llançador està en doble recolzament.

**Figura 9.** Diagrama de fuerzas teórico cuando el lanzador está en doble apoyo.

tant de l'eix vertical es pugui augmentar millor durant el període de recolzament doble, l'increment de velocitat al voltant de l'eix horitzontal es pot augmentar, tant en els períodes de recolzament doble com en els de recolzament simple, i crear Moments de força i transferir el Moment angular que en resulta al martell.

---

Hasta aquí la forma de producir Momento de Fuerza y como se incrementa la velocidad del martillo alrededor del eje horizontal durante el período de apoyo simple, pero durante la fase de apoyo doble también se puede incrementar la velocidad angular del martillo a través del eje horizontal. Según la teorización que realiza sobre esta cuestión Dapena & Mc Donald (1989), esto podría ocurrir de dos maneras distintas: a) podría conseguirse aplicando más fuerza de componente vertical contra el suelo con el pie izquierdo que con el derecho, lo que hace que la componente vertical de la fuerza se desplace hacia un lado del Cg. del Sistema lanzador más martillo (Figura 9,a), y b) haciendo que la fuerza vertical resultante que el suelo ejerce como reacción a la ejercida por los dos pies, sea lo más excéntrica posible desplazando el Centro de gravedad del sistema (Cgs.) más cerca de la vertical del apoyo del pie derecho que del izquierdo (Figura 9,b).

Como se desprende de lo expuesto y siendo cautos en las valoraciones, se puede concluir diciendo que, aunque es posible que la velocidad del martillo, alrededor del eje vertical, se pueda aumentar mejor durante el período de apoyo doble, el incremento de velocidad alrededor del eje horizontal se puede aumentar, tanto en los períodos de apoyo doble como los de apoyo simple, creando Momentos de fuerza y transfiriendo el Momento angular resultante al martillo.

---

## Bibliografia

---

ABDEL-AZIZ, Y.; KARARA, H.M.: "Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry" Proc. ASP/UI Symp. Close-Range Photogrammetry, Urbana, Illinois. Falls Church, V.A.: American Society of Photogrammetry, 1-18, 1971.

BONDARTSCHUK, A.P.: "Die moderne technik beim hammerwerfen. Leichtathletic, österreich 2. 3, 22-23, 1979.

BONDARTSCHUK, A.P.: "La técnica moderna en el lanzamiento de martillo". Cuadernos de Atletismo, 20. 65-72, 1987 (traducido de las actas del Congreso de la E.A.C.A.: Aix-les-bains, 1987).

CLAUSER, C.E.; McCONVILLE, J.T.; YOUNG, J.W.: Weight, volume and center of mass of segments of the human body. ARML Technical report. 69-70, Wright-Patterson Air Force Base, 1968.

DAPENA, J.: "A method determine the angular momentum of a human body about three orthogonal axes passing through its center of gravity" Journal of Biomechanics. 11, 251-256, 1978.

DAPENA & Col.: Análisis biomecánico de lanzamiento de martillo. Bloomington: Universidad de Indiana. (Traducción al español por Gil y Ramos), 1983.

DAPENA, J.: "The pattern of hammer speed during a hammer throw and influence of gravity on its fluctuations". Journal of Biomechanics. 17, 8, 553-559, 1984.

DAPENA, J.: "A kinematic study of center of mass motion in the hammer throw". Journal of Biomechanics. 19, 2, 147-158, 1986.

DAPENA, J.: "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, 1989.

- DAPENA, J.; McDONALD, G.: "A three-dimensional analysis of angular momentum in the hammer throw". *Medicine and science in sports and exercise*. 21, 2, 206-220, 1989.
- DAPENA, J.: "Some biomechanical aspects of hammer throwing". *Track Technique*. 111, 3.535-3.539, 1990.
- DURÁN, J.: "Técnica del lanzamiento de martillo". *Cuadernos de Atletismo*. 17, 79-97, 1985.
- GUTIÉRREZ, M.; SOTO, V.M.; MARTÍNEZ, M.: Sistema de análisis computarizado para el movimiento humano. Málaga: UNISPORT, 1990.
- HAY, J.G.; WILSON, B.D.; DAPENA, J.; WOODVORTH, G.G.: "A computational technique to determine the angular momentum of a human body". *Journal of Biomechanics*. 10, 269-277, 1977.
- HAY, J.G.: *Biomechanique des techniques sportives*. 438-445. París: Vigot, 1980.
- KUZNETSOV, V.: "Path and speed of the hammer in the turns". *Legk. Atletika*. 11, 11-12, 1965.
- KRIWONOSSOV, M.: "J. Gamski throws the hammer". *Yessis Review*. 7, 4. 65-99, 1972.
- KRIWONOSSOV, M. y col.: "Zum schnellkraft-und kraft-training von hammerwerfern". *Die lehre der leichtathletik*. 16, 1.673-1.674, 1980.
- POZZO, R.: "Metodi biomeccanici nell'allenamento del lancio del martello. Aspectti sui processi informativi". *Atleticastudi*. 4, 219-234, 1987.
- ROLF-GUNTER, J.: "Velocity in hammer throwing". *Track Technique*. 77, 2.449-2.450, 1979.
- SAMOZVETOV, A.: "The acceleration of the hammer". *Legkaya Atletika*. 11, 18-20, 1971.
- TSCHIENE, P.: (1980) "Nuevos elementos en la técnica del lanzamiento de martillo". *Cuadernos de Atletismo* 3. (traducido de *Leichtathletik*, 16, 1977).
- WOOD, G.A.; JENNINGS: "On the use of spline functions for data smoothing". *Journal of biomechanics*. 12: 477-479, 1979.

