

PRINCIPIOS BIOMECÁNICOS QUE INTERVIENEN EN LA EJECUCIÓN DEL SALTO DE ALTURA BIOMECHANICS PRINCIPLES INVOLVES IN THE HIGH JUMP

D. Javier Bermejo Frutos

Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. Entrenador de club de atletismo. (España)

javier_bermejo_frutos@hotmail.com

D. José Manuel Palao Andrés

Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte

Profesor de la Universidad de Murcia (España). Entrenador nacional de atletismo

palaojm@gmail.com

D. José Luis López Elvira

Doctor en CC. de la Actividad Física y el Deporte

Profesor de la Universidad Miguel Hernández de Elche (España)

Jose.lopeze@umh.es

FECHA RECEPCION: 20-10-12

FECHA ACEPTACION: 4-6-13

RESUMEN

El salto de altura es un movimiento deportivo de elevada complejidad técnica. El objetivo del salto de altura es superar un listón ubicado a una altura variable en función del momento de la competición, y con la premisa de superarlo mediante un apoyo simple de batida. La comprensión de las causas y los efectos de las diferentes posiciones y acciones durante una ejecución técnica es esencial para producir una mejora del rendimiento. Estos movimientos que lleva a cabo el saltador se realizan bajo los principios de la mecánica. Este documento revisa los fundamentos mecánicos que justifican las acciones que se realizan durante la ejecución de un salto de altura con el estilo de salto fosbury flop.

PALABRAS CLAVE: rendimiento, técnica, atletismo, salto.

ABSTRACT

The high jump is a sport movement with high technical complexity. The purpose of the high jump is to pass-over a bar located at a variable height using a single support take-off. Understanding the causes and effects of the different movements and positions is an essential piece to improve performance. This paper reviews the mechanical principles involved in the actions executed in high jump (fosbury flop style).

KEY WORDS: performance, technique, track and field, jump

1.- INTRODUCCIÓN

La interpretación de los resultados procedentes de los estudios biomecánicos es una tarea que entraña dificultad para los entrenadores (Knudson y Morrison, 2002). El conocimiento de las leyes mecánicas que afectan al salto de altura ayuda a establecer y comprender su patrón de movimiento y los límites en los que se encuentra el rango de movimiento óptimo (Ferro y Flórida, 2007). Por este motivo, la primera tarea para aumentar el conocimiento teórico de un movimiento deportivo y para poder determinar los factores que más influencia tienen sobre la ejecución técnica es identificar los propósitos mecánicos (objetivos) y los principios biomecánicos (leyes de la mecánica del movimiento) que explican las diferentes fases temporales de la prueba (Kreighbaum y Brathels, 1988).

La disciplina de salto de altura se ha estudiado desde una perspectiva puramente mecánica, analizando las causas y los efectos que producen determinados movimientos sobre el rendimiento global del salto y sobre el rendimiento específico de cada una de las fases temporales en las que se divide la acción técnica. Sin embargo, aunque existen publicaciones que recogen principios biomecánicos de aplicación general (Aguado, 1993; Knudson y Morrison, 2002; Knudson, 2008; Knudson, 2013), en la revisión realizada

no se ha encontrado ningún documento en el que apliquen estos principios a cada una de las fases del salto de altura. La finalidad de este trabajo es divulgar estos principios a los entrenadores, los atletas, y los profesionales del deporte. La información que aquí se recoge es el resultado de la revisión de la bibliografía existente sobre el salto de altura.

La estructura que se sigue tiene como punto de partida la definición del salto de altura y la división del movimiento en diferentes fases o partes para mejorar su análisis y comprensión. Posteriormente, se analiza cada fase temporal de manera aislada identificando: los propósitos mecánicos (objetivos), los factores biomecánicos de eficacia (aspectos que determinan el logro de los objetivos), y los principios biomecánicos (que principio es y en que consiste). Dentro de cada principio biomecánico, se analizan las consideraciones técnicas básicas (cuando se produce y como se produce), las implicaciones que tienen estas consideraciones técnicas en el salto (mecánica), y el efecto de las variaciones que se realizan en el patrón motor de referencia sobre el resultado final del salto.

2.- MARCO TEÓRICO

El salto de altura se engloba dentro del concurso de saltos del atletismo, junto con el salto de longitud, el triple salto, y el salto con pértiga. Este movimiento deportivo se define como una habilidad cerrada y discreta (Kreighbaum y Brathels, 1988). Se trata de una acción de tipo acíclico, con un comienzo y final determinado, ejecutándose sólo una vez (Grosser y Neumaier, 1986). Su objetivo es proyectar el centro de masas (CM) lo más alto posible para pasar el listón mediante movimientos segmentarios específicos. Los movimientos que se realizan para lograr este objetivo determinan la técnica empleada (Langlade y Langlade, 1986). La técnica utilizada más empleada actualmente en el salto de altura se denomina "fosbury flop", en la cual el saltador trata de franquear el listón de espaldas al mismo (figura 1).

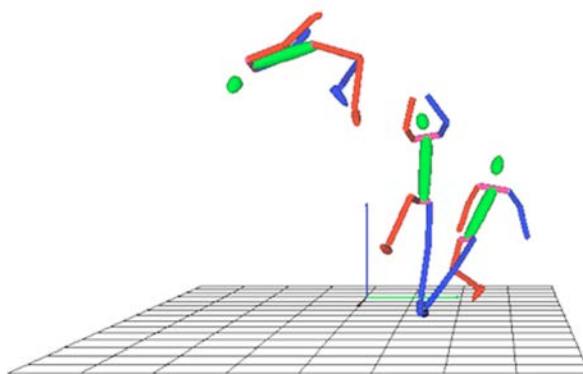


Figura 1. Estilo de salto fosbury flop.

Este estilo de salto se divide en tres fases fundamentales (figura 2): carrera de aproximación, batida, y vuelo o paso del listón (Brüggemann y Loch, 1992; Dapena, 1992; Houviön et al., 1986). Sus principales características son: a) la carrera de aproximación describe una curva en la parte final (Patrick, 2001); b) al final de la batida, la pierna de impulso está extendida, la pierna libre está flexionada con el muslo paralelo al suelo, y los brazos están elevados por encima de los hombros (Dapena, 1988); y c) el paso del listón se realiza en una posición corporal denominada de arqueo (Tidow, 1993).

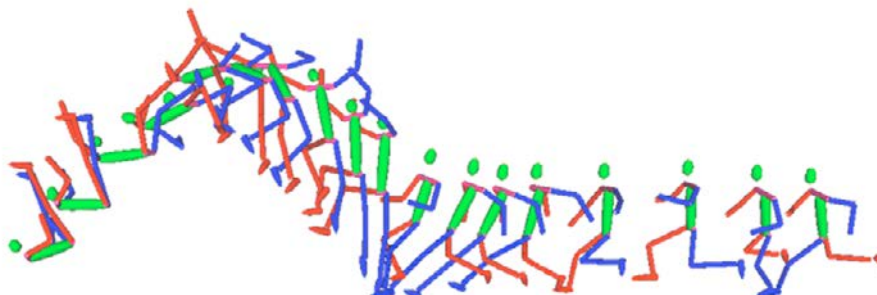


Figura 2. Foto-seriación de las fases temporales del salto de altura (ante-salto, batida, y paso del listón).

Tras la realización de la carrera de aproximación y la batida, en el vuelo el CM del saltador describe un movimiento de tipo parabólico (Hall, 2003), cuya trayectoria se encuentra definida matemáticamente (Hackett, 1989; Schexnayder, 1994; Tidow, 1993). La altura alcanzada por el CM está determinada principalmente por tres variables cinemáticas correspondientes a la parte final de la fase de batida: a) velocidad resultante de salida (VR), b) ángulo de proyección respecto a la horizontal (α), y c) altura de liberación (H1) (Dyson, 1982). Aunque la trayectoria del CM no se puede modificar en la fase aérea, el saltador puede ejecutar movimientos segmentarios para pasar el listón de la forma más eficaz. Esto implica adaptar las fases del salto a este propósito. Por ello, tras realizar la batida el saltador realiza movimientos en diferentes planos y ejes para lograrlo. Se trata de un movimiento complejo sobre un plano tridimensional.

3.- METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la redacción de este artículo se han utilizado: a) teorías, conceptos, y principios de la mecánica provenientes de la bibliografía genérica existente sobre biomecánica deportiva (libros y artículos divulgativos sobre entrenamiento deportivo) y b) resultados de investigaciones específicas de la prueba de salto de altura publicados en diferentes revistas de ámbito nacional e internacional. El punto de partida para elaborar este artículo tiene su origen en la propuesta realizada por Kreighbaum y Brathels (1988) para el análisis y evaluación de la técnica deportiva.

4.- RESULTADOS

4.1.- Principios biomecánicos de la carrera de aproximación del salto de altura

La carrera de aproximación se define como el periodo de tiempo que transcurre desde que el saltador empieza a moverse hacia el listón hasta el instante de realizar el contacto con el pie de batida en el suelo (figura 3). Los objetivos de esta fase del salto de altura son dos: a) generar niveles óptimos de energía cinética, es decir, velocidad de desplazamiento horizontal del CM (Dapena, 1992); y b) lograr las condiciones idóneas para afrontar la batida, esto es, lugar de batida y posición del cuerpo (Paolillo, 1989). Para lograr estos dos objetivos se buscan los siguientes aspectos: a) una relación óptima en la longitud entre los tres últimos apoyos de carrera (Ritzdorf, 1986); y b) lograr una inclinación corporal adecuada durante la parte curva de la carrera (Gutiérrez y Soto, 1992; Tidow, 1993).

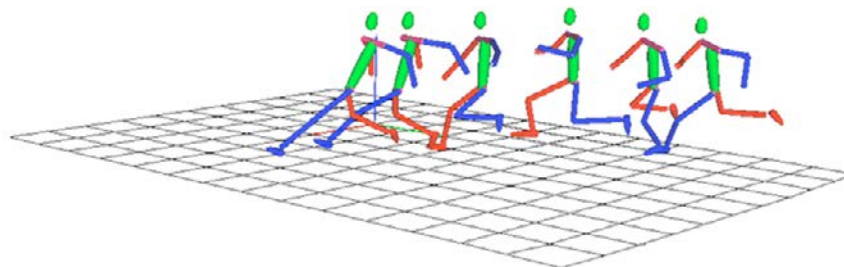


Figura 3. Fase de ante-salto (dos últimos pasos).

Los principios biomecánicos que determinan la consecución de los objetivos de la carrera de aproximación son cinco: 1) principio de conservación de la estabilidad dinámica y conservación del momento horizontal, 2) principio de velocidad específica, 3) principio de aceleración positiva y transmisión de las fuerzas al impulso, 4) principio de fuerza centrífuga y fuerza centrípeta, y 5) principio de conservación del momento angular.

4.1.1.- Principio de conservación de la estabilidad dinámica y conservación del momento horizontal

Definición. Para lograr que la carrera de aproximación se realice de forma controlada y estable, evitando acciones desequilibrantes que interfieran en la misma, el saltador debe tener en cuenta su masa y su velocidad de avance. Además, necesita mantener durante la parte en curva la velocidad generada en parte inicial de la carrera hasta llegar al punto de batida. La velocidad y la estabilidad del saltador depende de la cantidad de fuerza aplicada contra el suelo, el tiempo de aplicación de las fuerzas, y el posicionamiento de los apoyos (Schexnayder, 1994).

Consideraciones técnicas. El posicionamiento del pie al inicio del apoyo se realiza delante del cuerpo. El final del apoyo se realiza por detrás del CM. El apoyo del pie se realiza de metatarso y la acción de empuje termina con la pierna extendida completamente buscando un desplazamiento horizontal al suelo (Bravo et al., 2003).

Implicaciones mecánicas. El posicionamiento del pie delante del cuerpo aumenta el frenado del movimiento de avance del CM, mientras que el posicionamiento del pie detrás del cuerpo reduce las acciones de frenado e incrementa la velocidad horizontal del CM (Schexnayder, 1994).

Beneficios o efectos. Al aproximarse al punto de batida se produce un cambio en la relación de los tiempos de vuelo y apoyo, debido a la necesidad de acelerar el CM y preparar las condiciones óptimas para la batida (Schubin y Schustin, 1993). El mayor tiempo de aplicación de las fuerzas de impulso provoca gran cantidad de energía para acelerar el cuerpo del saltador al principio de la carrera, mientras que la menor duración del contacto provoca una mayor cantidad de potencia para mantener la velocidad al final de la carrera.

4.1.2.- Principio de velocidad específica

Definición. La optimización de la velocidad global de desplazamiento en el salto de altura no requiere maximizar la magnitud de velocidad, sino que es específica para cada saltador (depende de sus capacidades físicas y sus capacidades técnicas) y para cada momento de la competición (altura del listón) (Bothmischel, 1990).

Consideraciones técnicas. El saltador no se desarrolla la velocidad máxima durante la carrera de aproximación (Schlek, 2002).

Implicaciones mecánicas. El incremento de la velocidad de carrera genera mayor energía cinética y al posicionar el pie en la batida produce mejor aprovechamiento del ciclo estiramiento-acortamiento (CEA) y mayor velocidad final del CM (Dapena et al., 1990). La velocidad de carrera no puede ser máxima porque la preparación para la batida se realiza describiendo una curva en los últimos pasos (Tellez, 1993) y la batida busca lograr ángulos de proyección más verticales del CM mayores en relación a otros saltos (Locatelli, 1987).

Beneficios o efectos. La capacidad del saltador para beneficiarse del incremento de la velocidad de carrera se produce hasta cierto límite individual (Dapena y Chung, 1988). Esto se debe a que la velocidad máxima de carrera no permite generar la potencia necesaria y la proyección vertical requerida en el salto (Helene y Yamashita, 2005; Jacoby y Farley, 1995), puesto que el incremento de la velocidad requiere mayores niveles de fuerza (Bothmischel, 1990; Schexnayder, 1994).

4.1.3.- Principio de aceleración positiva y transmisión de las fuerzas al impulso

Definición. Para incrementar la velocidad de carrera se debe generar una aceleración progresiva en la misma dirección y sentido que la velocidad. En esta acción es importante la ubicación de los apoyos (Kreighbaum y Brathels, 1988).

Consideraciones técnicas. La realización de los apoyos durante la carrera de aproximación se realiza encima de la línea que representa el arco de la curva (Hubiche y Pradet, 1999).

Implicaciones mecánicas. El posicionamiento de los apoyos encima de la línea que representa la trayectoria del CM permite transmitir correctamente las fuerzas de impulso a la batida (Vélez, 1992), mejora la resistencia al hundimiento de la rodilla al salirse de la trayectoria, y permite el paso rápido de la cadera (Paolillo, 1989).

Beneficios o efectos. Durante la trayectoria curva el saltador puede realizar el penúltimo apoyo fuera de la línea que representa la trayectoria del CM (Bothmischel, 1990). El posicionamiento del penúltimo apoyo fuera de la trayectoria del CM provoca una menor transmisión de las fuerzas de empuje aunque un paso más rápido de la pierna de batida al punto de batida (Vélez, 1992).

4.1.4.- Principio de fuerza centrífuga y fuerza centrípeta

Definición. La parte final de la carrera se realiza en curva. Como consecuencia de correr describiendo una trayectoria curva al final de la carrera de aproximación, se genera una fuerza que expulsa al saltador hacia fuera, denominada fuerza centrífuga (FC). Para compensar esta fuerza centrífuga, el saltador se inclina lateralmente hacia el centro de la curva, ya que correr en una posición erguida requeriría un gran esfuerzo (Raffin-Peyloz, 1986).

Consideraciones técnicas. La inclinación lateral hacia el centro de la curva se realiza con el tronco en una posición alineada con los apoyos (Tidow, 1993).

Implicaciones mecánicas. La inclinación lateral hacia el centro de la curva durante la parte final de la carrera de aproximación permite al saltador correr la curva manteniendo una elevada velocidad de carrera y produce una fuerza de igual dimensión y dirección opuesta a la fuerza centrífuga, denominada fuerza centrípeta (Fcp) (Dapena, 1980a).

Beneficios o efectos. El nivel de inclinación lateral depende de la masa del saltador, de la velocidad de carrera, y del radio de curva (ecuación 1). Cuanto mayor sea la masa del saltador, mayor sea la velocidad de carrera, y mayor sea el radio de la curva, mayor será la inclinación lateral para compensar la fuerza de empuje lateral que se produce (Goldstein, 1980).

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo del nivel de inclinación lateral durante la trayectoria curva en la carrera de aproximación del salto de altura.

$$F = m \cdot v^2 / r$$

Siendo: m= masa del saltador.
v= velocidad de carrera.
r= el radio de curva.

4.1.5.- Principio de conservación del momento angular

Definición. Al llegar a la batida inclinado hacia el centro de la curva el saltador genera momento angular o momento rotatorio. El momento angular es la resistencia que ofrece el saltador a la variación de la velocidad angular, producida por la inclinación hacia el centro de la curva. El efecto de rotación es directamente proporcional a la distancia desde el eje de giro a la dirección de la fuerza (Kreighbaum y Brathels, 1988).

Consideraciones técnicas. Durante la parte de carrera en curva, el saltador se inclina lateralmente hacia el centro de la curva con el tronco alineado, manteniendo el cuerpo alejado del listón (Carr, 1999).

Implicaciones mecánicas. El momento angular permite convertir la velocidad de carrera en velocidad vertical, afrontar el listón de espaldas, e incrementar la velocidad de rotación durante el paso del listón (Dapena, 1995a).

Beneficios o efectos. Cuanto mayor sea la inclinación lateral hacia el centro de la curva mayor será el tiempo de aplicación de las fuerzas que producen la transferencia de velocidad y el giro sobre el eje transversal del saltador. Además, cuanto mayor sea la inclinación mayor será el descenso del CM al iniciar la batida. Este aspecto puede permitir incrementar el recorrido vertical del CM durante la batida (Dapena, 1987).

4.2.- Principios biomecánicos de la batida del salto de altura

La batida se define como el periodo de tiempo que transcurre entre el instante en que el pie de batida toma contacto con el suelo hasta el momento en el que lo abandona (figura 4). Los objetivos que se buscan lograr en esta fase son: a) despegar del suelo con las condiciones idóneas para afrontar el listón (Donskoi y Zatsiorski, 1988); b) transferir la mayor cantidad de la velocidad horizontal lograda en la carrera de aproximación en velocidad vertical al final de la batida (Tellez, 1993). Para lograr los objetivos de la batida se buscan cuatro aspectos: a) despegar el cuerpo en un ángulo de batida óptimo y generar el momento angular necesario para franquear el listón de espaldas (Donskoi y Zatsiorski, 1988); b) maximizar la altura a la que se encuentra el CM en el despegue, lo que contribuye a minimizar los requerimientos de fuerza debido a que el saltador tiene que elevarse menos para pasar una misma altura (Dapena, 1988); c) maximizar la contribución de los segmentos libres (Hay, 1993; Luthanen y Komi, 1978; Dapena, 1987; Harman et al., 1990), lo que produce una mayor velocidad vertical y, como consecuencia, una mayor altura de la parábola descrita por CM (Lees et al., 2000); y d) activar el mecanismo fisiológico del ciclo estiramiento-acortamiento de la musculatura de la pierna de batida, lo que produce una mayor fuerza contráctil de la musculatura extensora de rodilla de la pierna de batida (Dapena, 1980a; Ritzdorf, 1986).

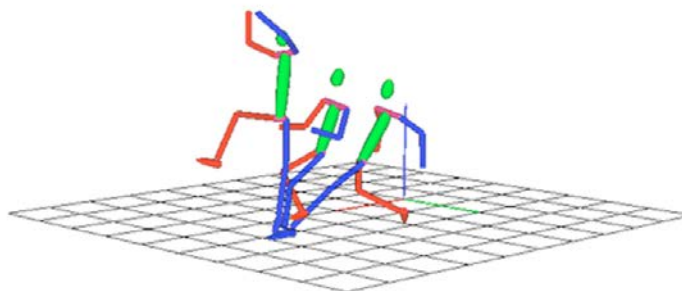


Figura 4. Fase de batida.

Los principios biomecánicos que determinan la consecución de los objetivos de la batida son siete: 1) principio de aceleración negativa-positiva y fuerzas excéntricas-concéntricas, 2) principio de impulso mecánico, 3) principio de Hochmuth, 4) principio conservación y transferencia de impulsos segmentarios, 5) principio de cantidad de momento angular, 6) principio de recorrido óptimo de aceleración, y 7) principio de acción-reacción.

4.2.1.- Principio de fuerzas excéntricas-concéntricas y principio de aceleración negativa-positiva

Definición. En el cuerpo humano, la musculatura puede mediante una contracción concéntrica generar movimiento y mediante una contracción excéntrica controlar el movimiento o absorber las fuerzas externas. Un movimiento acelerado en la misma dirección y sentido que en el que se mueve el cuerpo incrementa la cantidad de velocidad total, mientras que un movimiento acelerado en la misma dirección pero en sentido contrario al movimiento disminuye la cantidad de velocidad total (Hay, 1993).

Consideraciones técnicas. Al inicio de la batida el pie se posiciona en el suelo de forma plantar, delante del cuerpo, y con la rodilla casi totalmente extendida (Bravo et al., 2003; Tellez, 1993). Al final de la batida, la posición de la cadera del saltador es lo más alta posible y la pierna de batida empuja contra el suelo terminando la acción con la mayor extensión de la cadera, la rodilla, y el tobillo (Carr, 1999; Tidow, 1993).

Implicaciones mecánicas. Cuando se posiciona el pie al inicio de la batida, el CM frena su movimiento de avance y experimenta un ligero descenso. Se produce una aceleración negativa del CM y la musculatura de la pierna experimenta un estiramiento, contracción excéntrica. Al final de la batida, el impulso que se genera contra el suelo por parte de la pierna de batida produce una aceleración positiva del CM y la musculatura de la pierna se contrae mediante una contracción concéntrica (Dapena, 1980a; Dapena y Chung, 1988). La contracción excéntrica de la musculatura extensora de la rodilla de la pierna de batida produce una pre-activación de la musculatura que se puede aprovechar en la fase de impulso para producir una mayor cantidad de fuerza de contracción muscular y generar una mayor cantidad de impulso (Cavagna, 1977).

Beneficios o efectos. La capacidad del saltador para beneficiarse del ciclo estiramiento-acortamiento de la musculatura extensora de la pierna de batida está limitada por el nivel de preparación física, la velocidad de entrada, y la técnica. Cuanto mayor sea la capacidad física del saltador, mayor sea la velocidad de aproximación, y mayor sea la extensión de la rodilla, mayor será la capacidad para incrementar el impulso durante la fase concéntrica (Cavagna et al., 1968; Greig y yeadon, 2000; Reid, 1986).

4.2.2.- Principio de impulso mecánico

Definición. El efecto total de la fuerza producida durante la batida sobre el movimiento de elevación del CM es el producto de la magnitud de la fuerza y el tiempo de acción de la misma (Kreighbaum y Brathels, 1988).

Consideraciones técnicas. La acción de batida se realiza en un tiempo breve, cuya duración depende de la capacidad física del saltador y de las acciones realizadas por los segmentos libres. Los brazos y la pierna libre realizan un movimiento de balanceo de atrás hacia delante hasta terminar lo más elevados posible (Carr, 1999; Tellez, 1993; Tidow, 1993; Bravo et al., 2003).

Implicaciones mecánicas. El impulso generado durante la batida del salto de altura varía en función de la combinación de dos parámetros: tiempo y fuerza (Sears y Zemansky, 1979).

Beneficios o efectos. Es posible encontrar resultados similares en saltadores que utilizan los parámetros tiempo y fuerza de forma diferente. Se puede aplicar mucha fuerza en un tiempo breve o menos fuerza pero durante un tiempo más prolongado, obteniendo como resultado una misma cantidad de impulso final (Sears y Zemansky, 1979).

4.2.3.- Principio de Hochmuth

Definición. Si para acelerar una masa, esta ha de alcanzar una elevada velocidad final dentro de una dirección preestablecida, es mejor que el movimiento se inicie con una determinada fuerza en esa dirección. Esa fuerza se denomina fuerza inicial (Hochmuth, 1973) y su valor es decisivo para la velocidad final (Hay, 1993).

Consideraciones técnicas. Justo en el momento en que la cadera pasa por encima del apoyo durante la batida es cuando se debe ejercer la mayor cantidad de empuje contra el suelo, ayudándose de la acción de balanceo de los segmentos libres (Asmussen, 1974).

Implicaciones mecánicas. La fase de batida consta de tres subfases: amortiguación, sostén, e impulso. En la primera fase, la musculatura se estira en un movimiento de aceleración negativa, resistiendo el movimiento de avance del CM, y acumulando energía elástica. En la fase de sostén, el CM se encuentra más próximo al suelo, la flexión de rodilla es mayor, y la distancia radial es menor. En la fase de impulso, es cuando la pierna de batida y los segmentos libres pueden generar aceleración positiva sobre el CM (Bravo et al., 2003).

Beneficios o efectos. La batida del salto de altura se clasifica como una acción de tipo balístico (Asmussen, 1974). La velocidad vertical es igual a cero en la fase de sostén. Justo en este momento, al iniciar la fase de impulso, es cuando los músculos pueden ejercer mayor tensión. Si el saltador comienza el empuje pasada la fase de sostén el resultado será una menor elevación del CM durante el vuelo.

4.2.4.- Principio de conservación y transferencia de impulsos segmentarios

Definición. El empuje sobre el CM está determinado principalmente por la fuerza aplicada por la pierna de batida contra el suelo y por la contribución de los segmentos libres (brazos y pierna libre). La contribución de los segmentos libres depende de la capacidad técnica. La velocidad final es el resultado del sumatorio de las velocidades relativas de los diferentes segmentos. La velocidad máxima se deriva de la aplicación coordinada de los diferentes componentes de velocidad, los cuales deben alcanzar la mayor contribución al final de la ejecución (Hay, 1993; Kreighbaum y Brathels, 1988).

Consideraciones técnicas. Los segmentos libres, los brazos y la pierna libre, realizan una acción de balanceo coordinada de atrás hacia delante y de abajo hacia arriba (Carr, 1999; Tellez, 1993; Tidow, 1993; Bravo et al., 2003).

Implicaciones mecánicas. El balanceo de los segmentos libres produce una acción-reacción sobre el CM y el tronco, que incrementa la altura de salto (Harman et al., 1990; Luthanen y Komi, 1978; Oddsson, 1989; Yu y Andrews, 1998). Cuanto mayor sea el recorrido del CM, mayor será la aportación a la velocidad final (Cheng y Li, 2000).

Beneficios o efectos. Para aumentar la contribución de los segmentos libres al incremento de la velocidad vertical su acción se debe realizar de forma coordinada (Houvión et al., 1986), logrando la máxima velocidad al final de la acción (Bashian, 1977).

4.2.5.- Principio de cantidad de momento angular

Definición. Para pasar el listón, el saltador gira sobre el eje longitudinal y el eje transversal para adoptar la posición de espaldas al listón (Dapena, 1995a). Esta rotación se basa en el principio biomecánico denominado momento angular. El momento angular es una magnitud relacionada con las simetrías rotacionales de los sistemas físicos (Kreighbaum y Brathels, 1988). Se define como la resistencia que ofrece un cuerpo a la variación de la velocidad angular (producida por la inclinación hacia el centro de la curva). El efecto de rotación de una fuerza es directamente proporcional a la distancia desde el eje de giro a la dirección de la fuerza (Killing, 1997).

Consideraciones técnicas. La posición del saltador al inicio de la batida se realiza con inclinación corporal hacia el centro de la curva y hacia atrás, con el pie de batida delante del cuerpo, y con la pierna de batida extendida (Tellez, 1993; Bravo et al., 2003).

Implicaciones mecánicas. La inclinación lateral genera el momento angular lateral (HL) y la inclinación hacia atrás genera el momento angular frontal (HF). La suma de ambos da como resultado el momento angular resultante (HS) (Dapena y Bahamonde, 1991). El momento angular lateral se genera sobre un eje de rotación horizontal paralelo a la trayectoria final de carrera y contribuye a generar mayor elevación (Dapena, 1997). El momento angular frontal se genera sobre un eje de rotación horizontal perpendicular al eje de rotación del momento angular lateral y su incremento se encuentra determinado por la mayor contribución de los segmentos libres (Dapena, 1995b). El balanceo de la pierna libre hacia fuera del listón, por acción de los hombros y los brazos, produce una rotación sobre el eje longitudinal del saltador y genera el momento cinético (HT) (Despina, 1980).

Beneficios o efectos. Cuanto mayor sea la inclinación y mayor sea el tiempo durante el que se mantiene esta inclinación, mayor será la cantidad de momento angular que se genera y mayor será la cantidad de giro resultante. La mayor proximidad del punto de batida al listón requerirá de mayor cantidad de momento angular (Dapena, 1980b).

4.2.6.- Principio de recorrido óptimo de aceleración

Definición. Durante la batida, el saltador tiene la posibilidad de acelerar el CM durante un tiempo y un recorrido variable. El recorrido de la aceleración del CM ha de ser lo más recto posible o siempre curvilíneo en vez de ondulado (Hay, 1993).

Consideraciones técnicas. El recorrido del CM debe seguir una trayectoria lo más recta posible (Tidow, 1993). El saltador debe evitar acciones negativas de los brazos y la pierna libre.

Implicaciones mecánicas. El recorrido vertical del CM determina la velocidad vertical que se puede generar al final de la batida, junto con la componente horizontal, la reducción de velocidad horizontal, y la duración de la batida (Müller, 1986).

Beneficios o efectos. A mayor recorrido vertical del CM, mayor posibilidad de ejercer fuerza durante mayor tiempo, lo que permite obtener mayor velocidad vertical al final de la batida (Müller, 1986).

4.2.7.- Principio de acción-reacción

Definición. Siempre que un cuerpo o una parte del cuerpo aplica una fuerza sobre otro cuerpo o parte de él, el primero recibe, al mismo tiempo, una fuerza de igual magnitud, pero de sentido contrario (Kreighbaum y Brathels, 1988).

Consideraciones técnicas. El saltador debe focalizar la atención en ejercer la mayor cantidad de fuerza contra el suelo (Tellez, 1993).

Implicaciones mecánicas. Al posicionar el pie al inicio de la batida se frena la inercia acumulada durante la carrera y aumenta la tensión en la musculatura extensora de la pierna de batida (Tancic, 1988). Se produce el CEA, lo que permite incrementar la fuerza aplicada en la batida contra el suelo. Al progresar por la batida se llega a la fase de sostén y a partir de aquí comienza la fase impulso. En este punto del salto se aplica la 3ª ley de Newton de acción-reacción.

Beneficios o efectos. El empuje realizado por la pierna de batida contra el suelo produce una fuerza de igual magnitud, dirección, y sentido hacia arriba. Esta fuerza de reacción es la que produce la aceleración vertical del CM (Ritzdorf, 1986). Cuanto mayor sea el empuje mayor será la reacción del suelo.

4.3.- Principios biomecánicos de la fase de vuelo y paso del listón del salto de altura

La fase de vuelo y paso del listón se define como el periodo temporal que transcurre desde que el pie de batida abandona el suelo, tras finalizar la batida, hasta que se produce el contacto con la colchoneta (figura 5). El objetivo que se busca lograr en la fase de vuelo y paso del listón es adoptar una posición eficiente de arqueo sobre el listón para conseguir un paso más eficaz de los segmentos y del CM en relación a un paso sin arqueo hacia atrás del cuerpo (Dyson, 1982; Hay, 1993). Para lograr el objetivo de la fase de vuelo y paso del listón se busca que en el momento de perder el contacto con el suelo el eje longitudinal del saltador esté verticalmente alineado (Dyson, 1982; Paolillo, 1989; Tellez, 1993; Tidow, 1993). Es necesaria una gran flexibilidad de la columna y el desarrollo de la percepción del esquema corporal (saber en cada momento donde se encuentra cada parte del cuerpo).

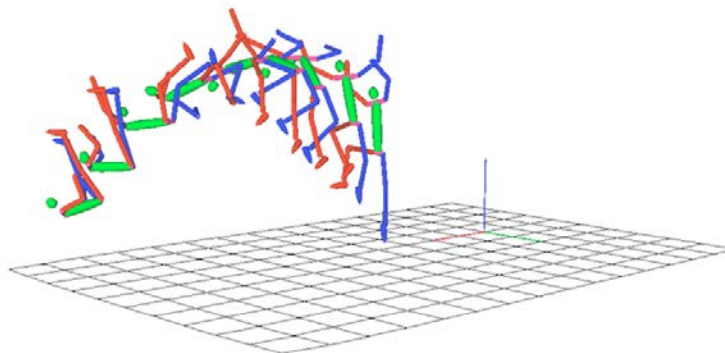


Figura 5. Fase de vuelo y paso del listón.

Los principios biomecánicos que determinan la consecución del objetivo de la fase de vuelo y paso del listón son tres: 1) principio de conservación de la cantidad de movimiento, 2) principio de centro de masas, de acción-reacción segmentaria, y de acción-reacción rotacional, y 3) principio de momento inercia y de momento angular.

4.3.1.- Principio de conservación de la cantidad de movimiento

Definición. El impulso generado sobre un cuerpo determina la trayectoria de desplazamiento de su centro de masas. Este desplazamiento durante la fase del vuelo del CM sólo se puede modificar por acción de fuerzas externas. La gravedad (de dirección vertical y sentido hacia abajo) es la única fuerza externa que modifica la trayectoria del CM durante el vuelo (Kreighbaum y Brathels, 1988).

Consideraciones técnicas. El saltador necesita generar un fuerte impulso para que durante la fase de vuelo el CM del saltador describa una elevada parábola (Tidow, 1993).

Implicaciones mecánicas. Durante la batida, el saltador genera un impulso (velocidad horizontal y velocidad vertical) que determina la longitud y la altura de la parábola de salto durante la fase de vuelo. Este impulso continúa después de la batida por la ley de conservación del impulso (Beulke, 1977).

Beneficios o efectos. La acción de la gravedad sobre el saltador determina que la trayectoria de su CM sea una parábola y que se produzca una pérdida constante de velocidad vertical hasta llegar al punto más alto de la parábola, donde su valor es cero (Sears y Zemansky, 1979).

4.3.2.- Principio de centro de masas, acción-reacción segmentaria, y acción-reacción rotacional

Definición. Las fuerzas externas modifican el movimiento del centro de masas, mientras que las fuerzas internas modifican las partes del cuerpo con respecto al centro de masas del mismo cuerpo. Cuando un cuerpo está apoyado, las fuerzas internas pueden cambiar la trayectoria del centro de masas. Cuando un cuerpo está en el aire, las fuerzas internas sólo modifican la posición de las partes del cuerpo con respecto al centro de masas (Kreighbaum y Brathels, 1988).

Consideraciones técnicas. Cuando un segmento se mueve en una dirección, el segmento opuesto realiza un movimiento contrario para compensar este movimiento (Patrick, 2001). El saltador adopta una posición de arqueo hacia atrás con los brazos extendidos y abiertos, con las piernas fijadas, con las rodillas flexionadas, con la punta de los pies hacia abajo, con la columna arqueada, y con la cabeza hacia atrás (Tidow, 1993; Bravo et al., 2003).

Implicaciones mecánicas. Los movimientos que realizan los segmentos en la fase aérea se consideran fuerzas internas y modifican la posición relativa de las partes del cuerpo respecto al CM. Estos movimientos se realizan con el objetivo de adoptar una posición que permita un paso más eficaz del listón (Despina, 1980).

Beneficios o efectos. Al descender los segmentos por debajo de la altura del CM se produce como consecuencia una elevación del resto del cuerpo que facilita la acción de arqueo sobre el listón (Patrick, 2001). Además, es posible modificar la velocidad de rotación de los segmentos. Al disminuir la velocidad de una parte la opuesta compensa un movimiento incrementando la velocidad, y viceversa (Dyson, 1982).

4.3.3.- Principio de momento inercia y momento angular

Definición. La inercia de rotación de un cuerpo depende de la masa total involucrada y de la distancia promedio del centro de masas al eje de giro. El efecto de rotación de una fuerza es directamente proporcional a la distancia desde el eje de giro a la dirección de la fuerza (Kreighbaum y Brathels, 1988).

Consideraciones técnicas. Los saltadores mantienen la pierna libre con una flexión de la rodilla en un ángulo recto y con el muslo paralelo al suelo (Bravo et al., 2003).

Implicaciones mecánicas. La flexión de la rodilla de la pierna libre y la posición del muslo paralela al suelo produce una velocidad de giro que disminuye a medida que incrementa el nivel de extensión de la pierna libre (Dyson, 1982).

Beneficios o efectos. La rotación de los segmentos depende de la distancia desde el eje de giro (eje longitudinal del saltador) a la dirección de la fuerza (Dapena, 1995a). Cuanto mayor sea la masa y el número de segmentos implicados y la distancia con el eje de rotación, mayor será el momento inercia y menor la velocidad de giro (Dapena, 1980b).

5.- CONCLUSIONES

En la prueba de salto de altura se manifiestan una gran cantidad de principios biomecánicos que determinan la eficacia del movimiento. La identificación de estos principios ayuda a comprender las acciones que se ejecutan durante las fases temporales del movimiento (ante-salto, batida, y paso del listón). El conocimiento de estos principios es una de las primeras tareas que se debe realizar cuando se analiza un movimiento deportivo (Knudson y Morrison, 2002). No es posible analizar, evaluar, y diagnosticar propuestas de mejora si no se comprende el porque de los movimientos.

El presente documento puede ayudar a los entrenadores y los atletas a aumentar el nivel de comprensión teórico del salto de altura y puede facilitar la determinación de los factores implicados en una ejecución eficaz. La comprensión de los principios mecánicos puede ayudar a los técnicos deportivos a determinar las actuaciones más adecuadas (ejemplo: feedback) con su saltador.

6.- REFERENCIAS

- Aguado, X. (1993). Eficacia y técnica deportiva: análisis del movimiento humano. Barcelona: INDE.
- Asmussen, E. (1974). Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscles during exercise. *ActaPhysiology*, 92(4), 537-545.
- Bashian, A. (1977). Arm action in the flop. *Track Technique*, 69, 2206-2208.
- Boulke, H. (1977). The physical significance of the curved run up in the Fosbury flop. *Track and Field Quarterly Review*, 77(3), 37-40.
- Bothmischel, V. E. (1990). Model characteristics of the high jump approach. *Modern Athlete and Coach*, 28(4), 3-6.
- Bravo, J., Ruf, H., y Vélez, M. (2003). Saltos verticales. Madrid: RFEA.
- Bruggemann, G. y Loch, M. (1992). The scientific research project at the III world championships in athletics: High jump. *New Studies in Athletics*, 7(1), 67-74.
- Carr, G. (1999). *Fundamentals of Track and Field*, 2ª ed. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Cavagna, G. A. (1977). Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. *Exercise Sport Science Reviews*, 5, 89-129.
- Cavagna, G. A., Dusman, B., y Margaria, R. (1968). Positive work done by previously stretched muscle. *Journal of Applied Physiology*, 24(1), 21-32.
- Cheng, C. Y. y Li, J. S. (2000). Discussion of the biomechanical significance of swinging the arms and hands during the take-off in the high jump. *Zhejiang Sports Science*, 22(6), 49-50, 59.
- Dapena, J. (1980a). Mechanics of translation in the Fosbury-flop. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(1), 37-44.
- Dapena, J. (1980b). Mechanics of rotation in the Fosbury-flop. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(1), 45-53.

- Dapena, J. (1987). Basic and Applied Research in the Biomechanics of High Jumping. *Medicine Sports Science*, 25, 19-33.
- Dapena, J. (1988). Biomechanical analysis of the Fosbury-flop. *Track Technique*, 105, 3343-3350.
- Dapena, J. (1992). Biomechanical studies in the high jump and the implications to coaching. *Track and Field Quarterly Review*, 92(4), 34-38.
- Dapena, J. (1995a). The rotation over the bar in the Fosbury-flop high jump. *Track Coach*, 132, 4201-4210.
- Dapena, J. (1995b). How to design the shape of a high jump run-up. *Track Coach*, 131, 4179-4181.
- Dapena, J. (1997). Contributions of Angular Momentum and Catting to the Twist Rotation in High Jumping. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(2), 239-253.
- Dapena, J. y Bahamonde, R. (1991). Biomechanical analysis of high jump. Report for scientific services project; USOC/TAC (US Olympic Training Center, Colorado Springs). Biomechanics Laboratory, Indiana University; Biomechanics Laboratory, Ball State University, USA.
- Dapena, J. y Chung, C. S. (1988). Vertical and radial motions of the body during the take-off phase of high jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 20(3), 290-302.
- Dapena, J., McDonald, C., y Cappaert, J. (1990). A Regression Analysis of High jumping technique. *Journal of Applied Biomechanics*, 6(3), 246-261.
- Despina, J. (1980). The Fosbury flop technique. *Track and Field Quarterly Review*, 80(4), 22-27.
- Donskoi, D. y Zartsiorski, V. (1988). *Biomecánica de los Ejercicios Físicos*. Moscú: Raduga.
- Dyson, G. (1982). *Mecánica del atletismo*. Buenos Aires: Stadium.
- Ferro, A. y Floría, P. (2007). La aplicación de la biomecánica al entrenamiento deportivo mediante el análisis cualitativo y cuantitativo. Una propuesta para el lanzamiento de disco. *Revista Internacional de Ciencias del deporte*, 3(7), 49-80.
- Goldstein, H. (1980). *Classical Mechanics*. Reading, Mass: Addison Wesley.
- Greig, M. P. y Yeadon, M. R. (2000). The influence of touchdown parameters on the performance of a high jumper. *Journal of Applied Biomechanics*, 16(4), 367-378.
- Grosser, M. y Neumaier, A. (1986). *Entrenamiento de la técnica*. Barcelona: Martínez Roca.
- Gutiérrez, M. y Soto, V. M. (1992). Análisis biomecánico del salto de altura en el estilo Fosbury- Flop (I). *Archivos de Medicina del Deporte*, 9(35), 253-263.
- Hackett, B. (1989). Analysis of the high jump crossbar in failed attempts. *Track technique*, 107, 3049-3411.
- Hall, S. J. (2003). *Basic biomechanics*. Madrid: McGraw Hill.
- Harman, E., Rosenstein, M., y Frykman, P. (1990). The effects of arms and counter movement on vertical jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(6), 825-833.
- Hay, J. G. (1993). *The Biomechanics of Sports Techniques*. New Jersey: Prentice Hall.
- Helene, O. y Yamashita, M. T. (2005). A unified model for the long and high jump. *American Journal of Physiology*, 73(10), 906-908.
- Hochmuth, G. (1973). *Biomecánica de los movimientos deportivos*. Madrid: INEF de Madrid.
- Houvión, M., Prost, R., y Raffin-Peyloz, H. (1986). *Tratado de atletismo: Saltos*. Barcelona: Hispano Europea.
- Hubiche, J. L. y Pradet, M. (1999). *Comprender el atletismo*. Barcelona: Inde.
- Jacoby, E. y Farley, B. (1995). *The Complete Book of Jumps*. Human Kinetics.
- Killing, W. (1997). An investigation of special jumping training in the high jump. *New Studies in Athletics*, 12(4), 53-64.
- Knudson, D. (2008). Qualitative biomechanical principles for application in coaching. *Sports Biomechanics*, 6(1), 109-118.

- Knudson, D. (2013). *Qualitative diagnosis of human movement. Improving performance in sport and exercise* (3 ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Knudson, D. y Morrison, C. (2002). *Qualitative analysis of human movement*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Kreighbaum, E. y Brathels, K. M. (1988). *Biomechanics: a qualitative approach for studying human movement*. Minnesota: Burgess Publishing Company.
- Langlade, A. y Langlade, N. R. (1986). *Teoría general de la gimnasia*. Buenos Aires: Stadium.
- Lees, A., Rojas, J., Ceperos, M., Soto, V., y Gutierrez, M. (2000). How the free limbs are used by elite high jumpers in generating vertical velocity. *Ergonomics*, 43(10), 1622-1636.
- Locatelli, E. (1987). Technical and methodological considerations on the jumps. *New Studies in Athletics*, 2(2), 23-40.
- Luthanen, P. y Komi, P. (1978). Segmental contribution to forces in vertical jump. *European Journal of Applied Physiology*, 38(1), 181-188.
- Müller, A. F. (1986). *Biomechanik des Hochsprungs*. Stuttgart: Verlag.
- Oddsson, L. (1989). Motor patterns of a fast voluntary postural task in man: trunk extension in standing. *Acta physiologica Scandinavica*, 136(1), 47-58.
- Paolillo, B. (1989). Why use a curved approach to the flop high jumping style?. *Modern Athlete and Coach*, 27(1), 19-20.
- Patrick, S. (2001). High jump: technical aspects. *Track Coach*, 155, 4938-4940.
- Raffin-Peyloz, H. (1986). *Tratado de atletismo*. Barcelona: Hispano Europea.
- Reid, P. (1986). The high jump. *New Studies in Athletics*, 1(1), 47-53.
- Ritzdorf, W. (1986). High jump: results of a biomechanic study. Extract from the scientific report of the IAAF biomechanic research on the first World Junior Championships. *New Studies in Athletics*, 1(4), 33-51.
- Schexnayder, I. (1994). Special considerations for the high jump approach. *Track Technique*, 126, 4029-4031.
- Schlek, A. (2002). A long jump with supramaximal and normal speed. *New Studies in Athletics*, 17(2), 37-43.
- Schubin, M. y Schustin, B. (1993). Approaching heights – some model parameters of the high jump. *Modern Athlete and Coach*, 31(2), 31-33.
- Sears, F. y Zemansky, M. (1979). *Física general*. Madrid: Aguilar S.A.
- Tancic, D. (1988). Biomecánica de la técnica moderna de salto de altura, en: *Entrenamiento de alto nivel: saltos*. Madrid: RFEA.
- Tellez, K. (1993). Elements of the high jump. *Track Technique*, 125, 3987-3990.
- Tidow, G. (1993). Model technique analysis-part VIII: The flop high jump. *New Studies in Athletics*, 8(1), 31-44.
- Vélez, M. (1992). Control de la planificación y desarrollo del rendimiento en el fosbury flop. *Apuntes Educación Física*, 28, 7-16.
- Yu, B. y Andrews, J. G. (1998). The relation-ship between free limb motions and performance in the triple jump. *Journal of Applied Biomechanics*, 14(1), 223-227.