

EFFECTO DE LA MASA DEL BALÓN EN LA CINEMÁTICA DEL LANZAMIENTO EN BALONMANO

Effect of the mass of the ball on the kinematics of the handball throw

Marcos Gutiérrez-Dávila ¹ , Francisco Sanchez-Sanchez ² , Alberto Gutiérrez Castro ¹ , Carmen Gutiérrez Cruz ^{1*} 


1 Universidad de Granada
2 Universidad de Castilla la Mancha

* Correspondencia: cguierrezc@ugr.es

Recibido: 28/07/2021; Aceptado: 09/11/2021; Publicado: 28/02/2022

OPEN ACCESS

Sección / Section:
Análisis del rendimiento Deportivo /
Performance analysis in sport

 Editor de Sección / Edited by:
Sergio J. Ibáñez. Universidad de
Extremadura, España

Citación / Citation:
Gutiérrez-Dávila, M., Sánchez-
Sánchez, F., Gutiérrez-Castro, A.
Gutiérrez-Cruz, C., (2022). Efecto de
la masa del balón en la cinemática
del lanzamiento en balonmano. *E-
balonmano.Com*, 18(1), 73-82.

Fuentes de Financiación / Funding:
-

Agradecimientos/
Acknowledgments:
No funding reported by authors

Conflicto de intereses / Conflicts of
Interest:
All authors declare no conflict of
interest

Resumen

El objetivo de este estudio ha sido discriminar el efecto de cinco incrementos del 15% en la masa del balón sobre las variables cinemáticas más significativas que determinan el rendimiento de los lanzamientos de balonmano. Han participado doce jugadores masculinos especialistas en lanzamientos de primera línea y pertenecientes a la Liga Española Asobal de balonmano. Los lanzamientos fueron filmados con dos cámaras sincronizadas temporalmente a 250 Hz, lo que permitió obtener las coordenadas espaciales de un modelo compuesto por cinco marcadores corporales más el centro geométrico del balón. A partir de estas coordenadas, se determinaron las componentes de las posiciones y velocidad lineal del balón, así como las posiciones y velocidades angulares de rotación vertical del tronco superior, flexión del hombro, rotación externa/interna del hombro y flexión/extensión del codo. Los resultados indican que la velocidad del balón disminuye con el incremento de la masa del balón y que la velocidad angular de rotación interna del hombro es el factor más afectado, seguido de la extensión del codo. El tiempo de lanzamiento se incrementa cuando aumenta la masa del balón debido al mayor tiempo de retroceso. Se estima que un incremento del 15% de la masa del balón no tiene efecto sobre la cinemática del lanzamiento.

Palabras clave: Biomecánica; velocidad del balón; coordinación; análisis de video.

Abstract

The aim of this study was to discriminate the effect of five increases of 15% in the mass of the ball on the most significant kinematic variables that determine the throwing performance. The sample was comprised of twelve male players specializing in front-line throws and belonging to the Spanish Asobal Handball League. Every throw was recorded by two video cameras temporally synchronized at 250 Hz, which allowed us to obtain the spatial coordinates of a model made up of five body markers and the geometric center of the ball. From these coordinates, the components of the positions and linear velocity of the ball were determined, in addition, the angular positions and velocities of vertical rotation of the upper trunk, shoulder flexion, external / internal rotation of the shoulder, and flexion / extension of the elbow were also obtained. The results indicate that the velocity of the ball decreases with the increase in the mass of the ball and the angular velocity of internal rotation of the shoulder is the most affected factor, followed by the extension of the elbow. The throwing time increases when the mass of the ball increases due to the longer backward movement time of the ball. It is estimated that a 15% increase in the ball mass has no effect on the kinematics of the throw.

Key words: Biomechanics; ball velocity; coordination; video analysis.

Introducción

Los lanzamientos por encima del brazo constituyen uno de los patrones básicos que determinan el rendimiento de los jugadores de élite de balonmano. Su eficacia depende de la velocidad de salida del balón, la precisión, el tiempo de ejecución y la variabilidad funcional de su ejecución, aunque no siembre en este orden (Gutiérrez-Dávila, Rojas, Ortega-Becerra, Párraga y Campos, 2012). Probablemente, el factor que ha recibido más atención por parte de investigadores y entrenadores ha sido la velocidad de salida del balón, cuya eficacia se ha asociado a la fuerza y sincronización temporal de la musculatura implicada (Hermassi, Laudner y Schwesig, 2019; Van den Tillaar, 2004), lo que ha provocado que surjan diferentes métodos específicos de entrenamiento para mejorar su rendimiento. Además de los métodos clásicos utilizados para el incremento de la fuerza muscular (Hermassi, Chelly, Fathloun, y Shephard 2010; Marques, van den Tillaar, Vescovi, y González-Badillo, 2007), se han utilizado muy diversos entrenamientos específicos con diferentes masas de balones y tipos de lanzamientos, cuyos resultados han sido contradictorios, especialmente cuando se utilizan masas por encima de las reglamentarias (Raeder, Fernandez-Fernandez, y Ferrauti, 2015; Riemann, Hipko, Johnson, Murphy y Davies, 2019; van den Tillaar, 2004; van den Tillaar y Marques, 2011).

Probablemente el argumento más crítico a las propuestas de entrenamientos específicos utilizando pelotas con sobrepeso, hayan sido los cambios que podrían provocarse en la estructura temporal y espacial del lanzamiento (cinemática). Efectivamente, para los lanzamientos realizados por encima del brazo, está suficientemente acreditado que la velocidad máxima alcanzada por la pelota disminuye con el incremento de su masa, aunque esta relación difiere en función del rango utilizado en las masas de las pelotas (Cross, 2004, van den Tillaar y Ettema, 2004). Diferentes estudios han relacionado la velocidad de la pelota con la secuencia temporal de participación segmentaria (Fradet et al., 2004), así como con otros parámetros cinemáticos, entre los que destacan: la máxima velocidad angular de rotación interna del hombro, el rango de desplazamiento angular del codo y la máxima velocidad rotación del tronco (van den Tillaar y Ettema, 2007, Wagner, Pfusterschmied, von Duvillard y Müller, 2011). Según las relaciones expuestas, parece probable que la masa del balón también pueda afectar a las variables cinemáticas que están relacionadas con su máxima velocidad.

Con respecto a los lanzamientos por encima del brazo en balonmano, van den Tillaar y Ettema (2004), utilizando rangos de masas de pelotas entre 0.206 kg y 0.818 kg, han obtenido una clara relación inversa entre la masa del balón y las máximas velocidades angulares de rotación interna del hombro y de extensión del codo, además de un cierto incremento del tiempo de ejecución cuando aumenta la masa, sin que se hayan constatado cambios significativos en la estructura coordinativa del lanzamiento. Más tarde, estos mismos autores (van den Tillaar y Ettema (2011), utilizando masas del 20% por debajo y por encima de la masa reglamentaria, han confirmado que, cuando se utilizan pelotas con sobrepeso, se producen cambios del 4.3% en la velocidad máxima de la bola con respecto a la masa reglamentaria, una reducción de la velocidad máxima que se produce debido una reducción significativa de la máxima velocidad angular de extensión del codo y de rotación interna del hombro.

Los resultados expuestos confirman la hipótesis de que pequeños incrementos en la masa del balón provocan importantes cambios en la cinemática del lanzamiento. Aunque los datos expuestos parecen ser concluyentes, Skejåa, Møllerb, Benckec y Sørensen (2019), a partir de una revisión actualizada sobre la biomecánica del hombro en los lanzamientos de balonmano, ponen en duda que se pueda generalizar dicha hipótesis. Para ello argumentan que las excesivas diferencias entre los datos reportados no permiten realizar comparaciones estables entre los estudios incluidos en la revisión, probablemente debido al uso de diferentes metodologías y la escasa descripción de los métodos utilizados para medir las variables. Ante las controversias expuestas y la escasa investigación reportada, el objetivo de este estudio ha sido conocer el efecto de cinco incrementos del 15% en la masa del balón de balonmano sobre las variables cinemáticas más significativas que determinan el rendimiento de los lanzamientos por encima del brazo, utilizando para ello jugadores de élite, especialistas en lanzamientos exteriores (laterales) y una metodología diferente a la descrita por van den Tillaar y Ettema (2004, 2011). A partir de este análisis, se pretende detectar un rango de incrementos de masas que puedan servir de estímulo para el incremento de la fuerza muscular específica sin que se vea modificada la estructura temporal y espacial del lanzamiento. Se plantea como hipótesis que, utilizando metodologías y muestras diferenciadas con respecto a investigaciones precedentes, los efectos producidos por los incrementos de las masas del balón serán similares a los reportados en investigaciones previas y el incremento del 15% de la masa del balón producirá cambios importantes en la cinemática del lanzamiento.

Material y método

Participantes y procedimientos

Han participado doce jugadores masculinos especialistas en lanzamientos de primera línea y pertenecientes a equipos de la Liga Española Asobal de balonmano (edad 26.2 ± 2.6 años; masa 92.8 ± 13.7 m; talla 1.89 ± 0.07 kg). A todos ellos se les informó y solicitó su consentimiento para participar en este estudio y se respetaron el resto de indicaciones de la Declaración de Helsinki.

Después de 15 minutos de calentamiento, el lanzador se situaba a 13 m de la portería listo para recibir el pase desde su lado no dominante. Tras la recepción debían realizar un lanzamiento por encima del brazo en apoyo en el menor tiempo posible, debiendo obtener la máxima velocidad de salida del balón y dirigido hacia su lado dominante y zona media superior de la portería. A cada lanzador se le informó que tras la recepción del balón era libre de realizar su desplazamiento previo más habitual, aunque éste debía de mantenerse estable para todos los lanzamientos. Se les permitió utilizar “pega” y realizar lanzamientos antes de comenzar la toma de datos para adaptarse a la nueva masa del balón.

Se realizaron seis bloques de lanzamientos consecutivos hasta alcanzar 3 lanzamientos válidos en cada bloque. Se utilizaron seis balones con dimensiones reglamentarias con diferentes masas para cada bloque (0.460, 0.529, 0.598, 0.667, 0.736 y 0.805 kg). El incremento de las respectivas masas de los balones se realizó descosiendo balón y añadiendo masa alrededor de la superficie interna. El orden de los bloques se cambió para cada participante. El descanso entre cada lanzamiento fue de 2 minutos y entre cada bloque de diez minutos.

Recopilación y procesamiento de los datos

Todos los ensayos se grabaron con dos cámaras de vídeo JVC GC-PX100BE, a 250 Hz, situadas en el lado dominante del lanzador a 20 m del centro geométrico de la zona de lanzamientos y 30 m entre ellas. Las dos cámaras se sincronizaron temporalmente mediante el encendido de un led en el campo de visión común. Una tercera cámara de video CASIO EX-FH20, a 420 Hz, se situó perpendicular a la dirección de lanzamiento. Antes de la grabación, se filmó un sistema de referencia (SR) de $2,32 \times 1,58 \times 2$ m, situado en la zona de lanzamientos, donde el eje horizontal (X) estaba asociado al suelo y era perpendicular al plano de la portería (dirección de lanzamiento); el eje transversal (Y) estaba asociado al suelo y era perpendicular al anterior y el eje vertical (Z) era perpendicular a los otros dos.

Para el análisis se seleccionó el ensayo cuya velocidad de salida del balón era la mediana de los tres lanzamientos registrados en cada bloque, usando para ello un análisis 2D a partir de las imágenes procedentes de la cámara situada perpendicular a la dirección de lanzamiento y considerando las dimensiones del propio balón como sistema de referencia para escalar los desplazamientos del centro geométrico del balón.

Para los lanzamientos elegidos, se determinaron las coordenadas tridimensionales de seis puntos corporales del lanzador (centro de la articulación de la cadera del lado dominante, los dos hombros, el codo, muñeca y final del tercer dedo del lado dominante) más el punto correspondiente al centro geométrico del balón. Tras la sincronización temporal de las imágenes obtenidas por las dos cámaras, el proceso de obtención de las coordenadas espaciales se realizó en tres fases: a) para no interferir en el lanzamiento, se realizó una digitalización manual de las posiciones de los siete puntos (marcadores) a partir de las imágenes procedentes de las dos cámaras de vídeo, a una frecuencia de 125 Hz, b) se utilizó el método de transformación lineal directa (Abdel-Azir y Karara, 1971, pp. 1–18) para obtener las coordenadas espaciales de los seis puntos y c) a las coordenada obtenidas en la fase anterior, se les aplicaron las funciones Quintic splines (Wood y Jennings, 1979) para suavizar e interpolar dichas coordenadas a una frecuencia de 500 Hz.

Cálculo de los factores cinemáticos de rendimiento.

Las componentes rectangulares de la velocidad lineal del balón se obtuvieron a partir de la primera derivada de sus correspondientes posiciones con respecto al tiempo, utilizando para ello las funciones Quintic splines. La velocidad de despegue del balón se consideró como la resultante de las componentes espaciales en el instante en que la distancia entre el punto que define el final del tercer dedo y el centro geométrico del balón se hacía superior al radio del balón (0.09 m).

El desplazamiento angular de los hombros a través del eje vertical para cada intervalo de tiempo (Rotación tronco superior) se registró mediante el producto escalar de los vectores consecutivos que determinan su posición en el plano transversal (ver figura 1,A). El ángulo de la articulación del codo para cada instante se determinó mediante el producto escalar de los vectores que definen el brazo y el antebrazo. Se consideró la extensión del codo como valor positivo (ver figura 1B). Para obtener las posiciones angulares consecutivas de rotación interna/externa del hombro, se determinó el vector perpendicular al plano determinado por los vectores que determinan el brazo y el antebrazo, utilizando para ello su producto vectorial, a continuación, se determinó el ángulo comprendido entre dicho vector y su proyección en el plano transversal, utilizando para ello su producto escalar y, finalmente, el eje vertical del SR se asoció a la dirección del vector posición del tronco (posiciones espaciales de la cadera y hombro). Se consideraron valores positivos a la rotación interna del hombro (ver figura 1C). Para la determinación de la flexión del hombro o aducción horizontal del brazo se utilizó el producto escalar de los vectores que determinan el brazo y los hombros (ver figura 1D). Las respectivas velocidades angulares se obtuvieron a partir de la primera derivada de sus posiciones angulares con respecto al tiempo, utilizando para ello las funciones Quintic splines.

Para el análisis temporal se han considerado tres eventos: t_1) Inicio de la rotación de los hombros hacia la dirección de lanzamiento, considerado como la mitad del intervalo donde el desplazamiento angular se hace positivo y se mantiene esta tendencia, t_2) Máxima rotación externa del hombro, t_3) Despegue del balón de la mano del lanzador. El tiempo de lanzamiento se ha definido como el periodo comprendido entre t_1 y t_3 . Para profundizar en el análisis del tiempo utilizado para el lanzamiento, se han distinguido dos fases: a) Fase de retroceso, comprendida entre t_1 y t_2 y b) Fase de aceleración, comprendida entre t_2 y t_3 . En la fase de retroceso se han distinguido dos periodos temporales: a₁) Retroceso inicial, comprendido entre t_1 y el instante en que se alcanza la máxima velocidad angular de rotación externa del brazo (t_{MAX}) y a₂) Retroceso final, comprendido entre t_{MAX} y el instante en que se alcanza la máxima rotación externa del hombro (t_2).

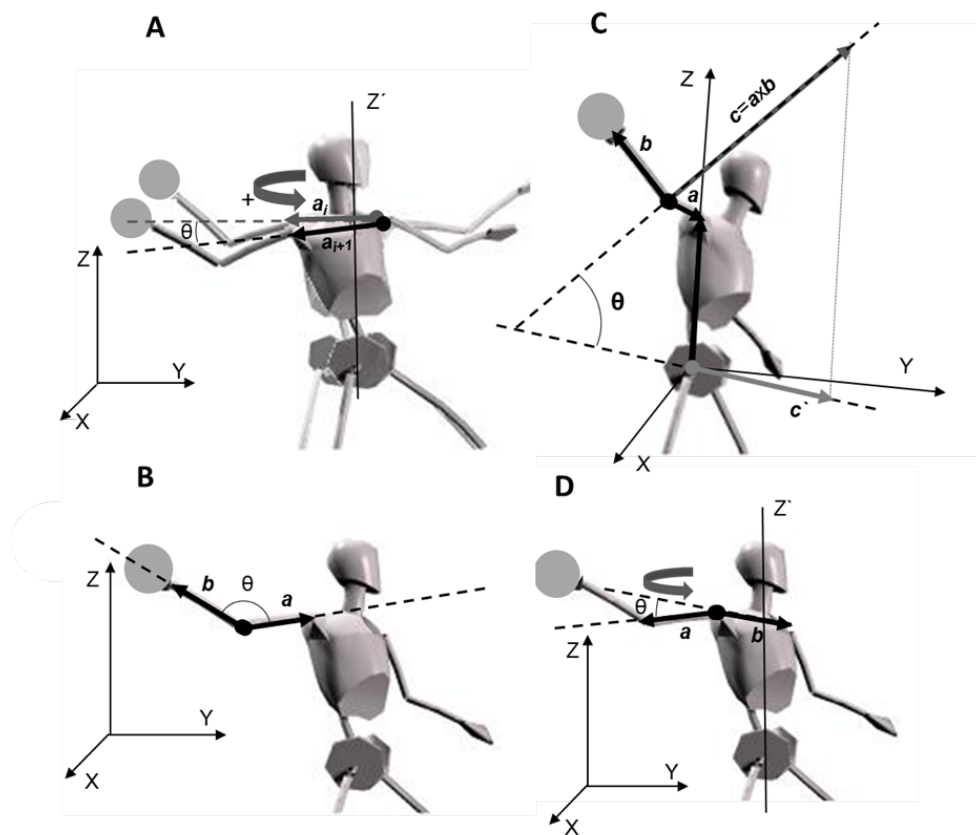


Figura 1. Representación gráfica para el cálculo de las posiciones angulares: (A) rotación del tronco superior, (B) flexo/extensión del codo, (C) Rotación externa/interna del hombro y (D) Flexión del hombro o aducción horizontal.

Análisis estadístico

Los datos descriptivos se presentan numéricamente como media \pm desviación estándar. Para todas las variables de interés se verificó la normalidad de los datos mediante una prueba de Shapiro-Wilk, obteniéndose en todas ellas una distribución normal (p osciló entre 0.184y 0.859). Se ha aplicado un análisis de varianza (ANOVA) para medidas repetidas (MR), para las seis masas del balón o condiciones de lanzamiento, junto a una comparación múltiple entre las seis condiciones de lanzamiento. Para todo ello se ha utilizado el paquete estadístico SPSS (IBM SPSS versión 22.0, Chicago, IL, USA).

Resultados

En la tabla 1 se presentan los datos de tendencia central y niveles de significación para la velocidad lineal de salida del balón y las máximas velocidades angulares de rotación del hombro y extensión del codo, para las diferentes masas del balón. Los datos indican que la velocidad de salida del balón se reduce de forma muy significativa con el incremento de la masa ($F=29.35$; $p<0.001$). Cuando se comparan las diferentes masas del balón por pares, siguen manteniéndose las diferencias entre las medias a nivel del 95% de confianza. Sólo en dos comparaciones no se ha alcanzado dicho nivel de confianza ($\Delta 15\%$ vs. $\Delta 30\%$ y $\Delta 45\%$ vs. $\Delta 60\%$). Un comportamiento similar ha tenido la máxima velocidad de rotación interna del hombro, reduciéndose de forma muy significativa con el incremento de la masa del balón ($F=30.95$; $p<0.001$). Sólo cuando se comparan las medias entre los dos balones más ligeros (Reglam. vs. $\Delta 15\%$), no se han alcanzado diferencias estadísticamente significativas entre sus medias. La máxima velocidad angular de rotación externa del hombro tiende a reducirse cuando se incrementa la masa del balón ($F=5.51$; $p<0.01$), aunque estas diferencias sólo se mantienen cuando el contraste entre las dos masas comparadas es igual o superior al 60%, con respecto a la masa reglamentaria. Un comportamiento similar se produce con la máxima velocidad angular de extensión del codo ($F=3.11$; $p<0.05$).

Tabla 1. Datos de tendencia central y niveles de significación para las velocidades lineal de salida del balón, así como de las máximas velocidades angulares de rotación del hombro y extensión del codo.

Variables	Masa del balón (kg)						F
	Reglam. (0.460)	$\Delta 15\%$ (0.529)	$\Delta 30\%$ (0.598)	$\Delta 45\%$ (0.667)	$\Delta 60\%$ (0.736)	$\Delta 75\%$ (0.805)	
Velocidad de salida balón (ms^{-1})	25.1 \pm 1.7	24.1 \pm 1.5 ¹	23.5 \pm 1.5 ¹	22.5 \pm 1.7 ^{1,2,3}	21.7 \pm 1.7 ^{1,2,3}	20.7 \pm 1.8 ^{1,2,3,4,5}	29.35***
Máx. vel. rotación externa (rads^{-1})	-24.5 \pm 7.8	-23.1 \pm 7.2	-23.8 \pm 8.2	-21.1 \pm 7.3 ^{1,3}	-20.3 \pm 8.2 ^{1,2,3}	-19.7 \pm 6.6 ^{1,2,3}	5.51**
Máx. vel. rotación interna (rads^{-1})	75.5 \pm 15.9	74.6 \pm 16.2	66.2 \pm 17.9 ^{1,2}	59.2 \pm 18.6 ^{1,2,3}	50.9 \pm 15.2 ^{1,2,3,4}	41.2 \pm 15.2 ^{1,2,3,4,5}	30.95***
Máx. vel. extensión codo (rads^{-1})	33.1 \pm 4.7	32.6 \pm 5.2	30.7 \pm 5.6	29.7 \pm 4.9	28.3 \pm 5.4 ^{1,2}	27.8 \pm 6.5 ^{1,2}	3.11*
Posiciones espaciales							
Ángulo máxima rotación externa ($^{\circ}$)	55 \pm 8	53 \pm 7	53 \pm 7	52 \pm 9 ¹	51 \pm 9 ^{1,2}	51 \pm 10 ¹	3.63**
Ángulo máxima flexión del codo ($^{\circ}$)	91 \pm 15	93 \pm 15	93 \pm 14	94 \pm 14	92 \pm 13	96 \pm 13 ¹	1.31
Dist. trayectoria de aceleración (m)	1.49 \pm 0.12	1.43 \pm 0.14	1.42 \pm 0.15 ¹	1.39 \pm 0.13 ¹	1.39 \pm 0.15 ¹	1.40 \pm 0.15 ¹	3.17**
Dist. media balón/hombro retroceso (m)	0.56 \pm 0.10	0.58 \pm 0.08	0.58 \pm 0.08	0.58 \pm 0.08	0.58 \pm 0.08	0.59 \pm 0.08 ¹	1.71
Dist. media balón/hombro aceleración (m)	0.62 \pm 0.06	0.63 \pm 0.06	0.62 \pm 0.05	0.62 \pm 0.06	0.62 \pm 0.06	0.63 \pm 0.06	0.40
Dist. balón/hombro máx. retroceso (m)	0.54 \pm 0.08	0.55 \pm 0.07	0.56 \pm 0.08	0.55 \pm 0.08	0.57 \pm 0.07 ¹	0.58 \pm 0.08 ^{1,2,4}	2.72*
Análisis temporal							
Tiempo de lanzamiento (ms)	160 \pm 13	161 \pm 15	169 \pm 16 ^{1,2}	171 \pm 13 ^{1,2}	173 \pm 13 ^{1,2}	181 \pm 19 ^{1,2,3,4,5}	18.19***
Tiempo de retroceso (ms)	76 \pm 14	78 \pm 13	87 \pm 12 ^{1,2}	85 \pm 12 ^{1,2}	87 \pm 13 ^{1,2}	90 \pm 16 ^{1,2}	5.73***
Tiempo de retroceso inicial (ms)	36 \pm 11	43 \pm 15	52 \pm 24 ¹	56 \pm 19 ^{1,2}	52 \pm 17 ¹	56 \pm 23 ^{1,2}	4.95***
Tiempo de retroceso final (ms)	40 \pm 14	35 \pm 15	35 \pm 15 ^{1,2}	29 \pm 10 ¹	33 \pm 14	34 \pm 15	1.11
Tiempo de aceleración (ms)	83 \pm 15	84 \pm 11	82 \pm 13	85 \pm 13	86 \pm 15	92 \pm 17 ^{1,2,3}	2.38

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ^{1,2,3,4,5} representan las diferencias significativas entre las condiciones ($p < 0,05$).

Nota: En el apartado de posiciones espaciales se presentan las posiciones angulares más significativas, la distancia recorrida por el balón a través de su trayectoria y su distancia con respecto al hombro. En el análisis temporal se presenta el tiempo empleado en el lanzamiento y sus respectivas fases y periodos.

En la tabla 1 también se presentan los datos de las posiciones espaciales más significativas. La máxima rotación externa del hombro (Ángulo máxima rotación externa) tiende a reducirse cuando se incrementa la masa del balón ($F=3.63$; $p<0.01$). La comparación por pares entre los diferentes incrementos de la masa indica que sólo se alcanzan diferencias a un nivel de confianza del 95%, cuando el contraste entre las masas es igual o superior al 45%. No han existido diferencias estadísticamente significativas para la máxima flexión del codo (Ángulo máxima flexión del codo). Sin embargo, se ha constatado un cierto incremento cuando el contraste entre las masas alcanza el 75%, con respecto a la masa reglamentaria del balón (Reglam. vs. $\Delta 75\%$; $p<0.05$).

La distancia recorrida por el balón a lo largo de su trayectoria de aceleración (*Dist. trayectoria de aceleración*) tiende a reducirse con el incremento de la masa ($F=3.17$; $p<0.01$). Cuando se comparan las masas del balón por pares, sólo se alcanzan niveles de significación cuando es igual o superior al 30% de la masa reglamentaria. Para evaluar la amplitud del movimiento del balón con respecto al hombro, se han registrado sus posiciones medias con respecto al hombro durante la fase de retroceso y de aceleración (*Dist. media balón/hombro retroceso*; *Dist. media balón/hombro aceleración*, respectivamente), sin que hayan existido diferencias estadísticamente significativas entre las medias con el incremento de la masa. Sin embargo, la posición del balón con respecto al hombro al final de la fase de retroceso (*Dist. balón/hombro máx. retroceso*) tiende a incrementarse cuando aumenta la masa del balón ($F=2.72$; $p<0.05$). Estas diferencias sólo se mantienen cuando el contraste entre las dos masas comparadas es igual o superior al 60% de la masa reglamentaria.

En la tabla 1 también se presenta el análisis temporal de las fases y periodos descritos para el lanzamiento. Los datos indican que el tiempo de lanzamiento se incrementa cuando aumenta la masa del balón ($F=18.19$; $p<0.001$). Las comparaciones por pares indican que las diferencias surgen cuando la masa del balón es igual o mayor al 30% de la masa reglamentaria, sin que hayan existido diferencias estadísticamente significativas entre las dos masas más ligeras. El tiempo de la fase de retroceso y su correspondiente periodo inicial, han tenido un comportamiento similar al descrito para el tiempo de lanzamiento ($F=5.73$; $p<0.001$; $F=4.95$; $p<0.001$), mientras que no han existido diferencias significativas para el periodo de retroceso final. Tampoco han existido diferencias estadísticamente significativas para la fase de aceleración. Sin embargo, las comparaciones por pares han constatado un incremento temporal significativo cuando el contraste entre las masas es igual al 75% de la masa reglamentaria.

En la tabla 2 se presentan los tiempos en que se producen las máximas velocidades angulares de rotación del tronco superior a través del eje vertical (*rotación tronco superior*), aducción horizontal del hombro o flexión del brazo (*flexión hombro*), extensión del codo (*extensión codo*) y rotación interna del hombro (*rotación interna hombro*). Los tiempos están referidos a un valor cero que corresponde con la suelta del balón, por lo que se expresan en valores negativos. Los datos indican que existe una cierta secuencia temporal próximo distal (P-D) que no está afectada por el incremento de la masa del balón. Sólo con incrementos mayores al 75% de la masa reglamentaria, se producen cambios significativos en la estructura temporal con respecto a las masas inferiores.

Tabla 2. Tiempos en los que se alcanzan las máximas velocidades angulares con respecto al instante de salida del balón para cuatro masas. (Los valores negativos indican que el tiempo se produce antes de la salida del balón).

Variables	Tiempo máxima velocidad angular (ms)				F
	Reglam. (0.460)	$\Delta 15\%$ (0.529)	$\Delta 45\%$ (0.667)	$\Delta 75\%$ (0.805)	
Salida balón	0±0	0±0	0±0	0±0	0
Rotación tronco superior	-88±19	-89±15	-97±22	-108±14 ^{1,2}	3.37*
Flexión hombro	-52±21	-44±19	-47±20	-70±27 ^{1,2,3}	6.10**
Extensión codo	-13±19	-10±8	-11±5	-6±5 ¹	1.73
Rotación interna hombro	0±1	0±1	0±1	0±2	0.74

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; 1,2,3, representan las diferencias significativas entre las condiciones ($p < 0,05$).

Discusión

Se constata que la velocidad de salida del balón disminuye cuando se incrementa la masa del balón, siendo la velocidad angular de rotación interna del hombro el factor que más contribuye a esta reducción y, en menor grado, la velocidad angular de extensión del codo. Estos resultados son coincidentes con las teorías físicas generales (Cross, 2004) y las correlaciones reportadas por Van den Tillaar y Ettema (2004) y Wagner et al. (2011), para estas mismas variables. Cuando se han comparado por pares los lanzamientos realizados con los balones de menor masa (Reglam. vs. $\Delta 15\%$) se mantiene esta tendencia, aunque no se han alcanzado diferencias estadísticamente significativas entre las medias de la máxima velocidad angular de la rotación interna del hombro y extensión del codo, lo que nos permite sugerir que un incremento del 15% de la masa del balón podría constituir el estímulo adecuado para mejorar la fuerza de la musculatura involucrada manteniendo constante su velocidad de contracción.

Es necesario ser cautos al generalizar estos resultados ya que se ha constatado que pequeños incrementos en la masa del balón provocan cambios importantes en la cinemática del lanzamiento (Skejva et al., 2019). Pero también existen otros factores que nos recomiendan tener cautela con la generalización de estos datos, como: la experiencia, el nivel de rendimiento y la masa de los jugadores. En este sentido, es necesario hacer referencia a los datos reportados por Van den Tillaar y Ettema (2011) al obtener diferencias estadísticamente significativas en las máximas velocidades de rotación interna del hombro y extensión del codo cuando comparan lanzamientos con pelotas de masa reglamentaria e implementadas el 20%. Aunque se trata de un porcentaje ligeramente superior al utilizado en esta investigación ($\Delta 5\%$), la principal razón de esta discrepancia podría estar motivada por las diferencias de sexo, peso y nivel de rendimiento de los jugadores analizados. Mientras que los datos reportados por Van den Tillaar y Ettema (2011) proceden de jugadoras jóvenes de nivel medio, en esta investigación han participado jugadores experimentados de alto nivel, con mayor masa relativa y especialistas en lanzamientos de exteriores. Factores, todos ellos, que deben tenerse en cuenta al generalizar este tipo de resultados. Estas diferencias entre las muestras también se manifiestan en la mayor velocidad de salida del balón, así como de las máximas velocidades de rotación interna del hombro y de extensión del codo, lo que coincide con las aportaciones de Wagner, Buchecker, von Duvillard y Müller (2010).

Los resultados también han constatado que el tiempo de lanzamiento tiende a incrementarse cuando aumenta la masa del balón, confirmándose así una tendencia ya descrita en otras investigaciones previas (van den Tillaar y Ettema, 2004). Sin embargo, cuando se comparan por pares los tiempos empleados para las dos masas más reducidas (Reglam. vs. $\Delta 15\%$) no han existido diferencias estadísticamente significativas. Por otra parte, el principal contribuyente al incremento del tiempo de lanzamiento ha sido el periodo inicial de la fase de retroceso. Este hecho podría estar relacionado con la tendencia a reducir la velocidad rotación externa del hombro cuando se incrementa de la masa del balón (ver tabla 1), ya que este periodo inicial de retroceso finaliza cuando se alcanza la máxima velocidad de rotación externa del hombro.

La principal causa del retroceso del brazo es la aceleración angular del segmento más proximal (rotación más flexión del tronco), tiene como objetivo la activación del ciclo estiramiento-acortamiento de los músculos rotadores del hombro y su intensidad se relaciona con las magnitudes del momento de inercia ($I=m \cdot r^2$) y la velocidad angular de rotación externa del hombro (Gutiérrez-Dávila, 2015, pp.278). Los datos indican que la distancia media entre el balón y el hombro del lanzador en la fase de retroceso no varía con el incremento de su masa (r), lo que nos permite considerar que el momento inercia del brazo del lanzador aumentará con el incremento de la masa del balón (m). De este modo, es probable que la velocidad angular de rotación externa del hombro se reduzca para no incrementar en exceso la actividad excéntrica de la musculatura. Se trataría pues, de un ajuste orientado a mantener los niveles de actividad excéntrica muscular, probablemente para proteger al hombro de cargas excesivas.

Teniendo en cuenta que la velocidad lineal del balón tiende a reducirse cuando aumenta su masa, sorprende que el tiempo de aceleración sólo se haya incrementado de forma significativa cuando la masa del balón excede del 70% con respecto a la masa reglamentaria (*Tiempo de aceleración*, -ver tabla 1). Los datos sugieren que la reducción de la velocidad del balón cuando se incrementa la masa, se vería compensada por una cierta reducción de la distancia de

aceleración (*Dist. trayectoria de aceleración*, -ver tabla 1-). Teniendo en cuenta que, durante esta fase de aceleración, la distancia media entre el balón y el hombro del lanzador no varía con el incremento de la masa (*Dist. media balón/hombro aceleración*, -ver tabla 1-), la reducción de la distancia de aceleración estaría motivada por el menor retroceso del balón. Efectivamente, el máximo ángulo de retroceso tiende a reducirse con el incremento de la masa del balón (*Ángulo máxima rotación externa*, ver tabla 1), probablemente como un mecanismo más de protección del hombre ante fuerzas inerciales excesivas.

A partir de los segmentos corporales analizados en este estudio, el primer segmento que alcanza su máxima velocidad angular es el tronco superior, seguido de la aducción horizontal del brazo (flexión del hombro) y, a continuación, coincidiendo con los instantes finales del lanzamiento, se produce la extensión del codo y la rotación interna del hombro, en este orden (ver tabla 2). La secuencia descrita es coincidente con aportaciones previas (Gutiérrez-Dávila, Ortega, Párraga, Campos y Rojas, 2011; van de Tillaar y Ettema, 2004, 2011) al describir una cierta secuencia temporal próximo distal (P-D), rota en los instantes finales al adelantarse la máxima velocidad angular de extensión del codo a la alcanzada por la rotación interna del hombro. Sin embargo, los resultados expuestos son discrepantes con las aportaciones de Fradet et al. (2004), al reportar éstos que la máxima velocidad angular del torso superior ocurre más tarde que la alcanzada por el codo, sugiriendo que el tronco superior incrementaría su velocidad angular hasta los instantes finales del lanzamiento. Un hecho que podría ocurrir cuando la dirección de lanzamiento es lado no dominante (punto débil), pero éste no es el caso, el protocolo utilizado en este estudio condiciona a que todos los lanzamientos se realicen hacia el lado dominante (punto fuerte).

Con respecto al efecto que han producido los cinco incrementos de la masa del balón en la secuencia temporal descrita, los datos indican que sólo se han producido cambios estadísticamente significativos cuando la masa del balón es el 75% mayor que la masa reglamentaria. Unos resultados que son coincidentes por las aportaciones van den Tillaar & Ettema (2011) al reportar que la estructura temporal del lanzamiento no varía cuando se producen cambios de masa del balón inferiores y superiores al 20% de la masa reglamentaria. En este sentido también se manifiestan Skejva et al. (2019) a partir de una reciente revisión sobre la cinemática del lanzamiento.

Aplicaciones prácticas

Se ha descrito que el incremento del 15% de la masa del balón no afecta a la cinemática de los lanzamientos de balonmano realizados por encima del brazo, lo que nos ha permitido sugerir que éste podría constituir el estímulo adecuado para mejorar la fuerza de la musculatura manteniendo constante su velocidad de contracción. Sin embargo, es necesario ser cautos al hacer referencia a este porcentaje, probablemente con jugadores jóvenes, en proceso de aprendizaje y con menor masa relativa a la muestra utilizada en este estudio, este porcentaje sea menor.

La intensidad de la fase excéntrica del ciclo estriramiento-acortamiento de los músculos rotadores internos del hombro se ajusta con el incremento de la masa del balón reduciendo su velocidad angular de rotación externa y reduciendo el máximo ángulo de retroceso. Probablemente sea un mecanismo orientado a proteger al hombro de cargas excesivas y evitar así lesiones.

Se ha constatado una cierta consistencia temporal y espacial de la fase de aceleración de lanzamiento cuando se utilizan incrementos hasta el 60% de la masa reglamentaria. Con las cautelas ya indicadas, para este rango de masas, su incremento sólo tendría efecto sobre la velocidad de los lanzamientos, pero no sobre su estructura. Una afirmación que adquiere especial relevancia en el diseño de las estrategias de entrenamientos de fuerza utilizando balones con sobrepeso. Es necesario considerar que la razón por la que esto ocurre se debe a que la fuerza aplicada al balón aumenta a un ritmo menor que la masa (Cross, 2004).

Referencias

- Abdel-Aziz, Y. I. y Karara, H. M. (1971). *Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry*. ASP Symposium on Close-Range photogrammetry (pp. 1–18), Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Cross, R. (2004). Physics of overarm throwing. *American Journal of Physics*, 72(3), 305-312. <https://doi.org/10.1119/1.1634964>.
- Fradet, L., Botcazou, M., Durocher, C. Cretual, A., Multon, F., Prioux, J. y Delamarche, P. (2004). Do handball throws always exhibit a proximal-to-distal segmental sequence?. *Journal of Sports Sciences*, 22, 439–447. <https://doi.org/10.1080/02640410310001641647>
- Gutiérrez-Dávila, M. (2015). *Fundamentos de biomecánica deportiva* (pp:278). Madrid: Editorial Síntesis.
- Gutiérrez-Dávila, M.; Ortega, M., Párraga, J., Campos, J. y Rojas, F.J. (2011). Variabilidad de la secuencia temporal de la cadena cinética en el lanzamiento de balonmano. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 11(43): 455-471. <http://cdeporte.rediris.es/revista/revista43/artvariabilidad238.htm>
- Gutiérrez-Dávila, M., Rojas, J., Ortega-Becerra, M., Párraga, J. y Campos, J. (2012). Variabilidad funcional como factor de eficacia en los lanzamientos de balonmano, *e-balonmano.com: Revista de Ciencias del Deporte*, 8 (2), 121-134.
- Hermassi, S., Laudner, K. y Schwesig, R. (2019). Playing level and position differences in body characteristics and physical fitness performance among male team handball players, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, 149. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00149>
- Hermassi, S, Chelly, MS, Fathloun, M, y Shephard, RJ. (2010). The effect of heavy- vs. moderate-load training on the development of strength, power, and throwing ball velocity in male handball players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9): 2408–2418. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e58d7c>
- Marques, M.C., van den Tillaar, R., Vescovi, J.D. y González-Badillo, J.J. (2007). Relationship Between Throwing Velocity, Muscle Power, and Bar Velocity During Bench Press in Elite Handball Players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2(4): 414-422. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2.4.414>
- Raeder, C., Fernandez-Fernandez, J. y Ferrauti, A. (2015). Effects of six weeks of medicine ball training on throwing velocity, throwing precision, and isokinetic strength of shoulder rotators in female handball players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(7): 1904-1914. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000847>
- Riemann, B.L., Hipko, N., Johnson, W., Murphy, T. y Davies, G.J. (2019). Effects of medicine ball mass on the intensity of 90°/90° plyometric throwing exercise. *Physical Therapy in Sport*, 40: 238-243. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2019.10.002>
- Skejå, S.D., Møllerb, M., Benckec, J. y Sørensen, H. (2019). Shoulder kinematics and kinetics of team handball throwing: A scoping review. *Human Movement Science*, 64: 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.02.006>.
- van den Tillaar, R. (2004). Effect of different training programs on the velocity of overarm throwing: A brief review. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(2): 388–396. <https://doi.org/10.1519/R-12792.1>.
- van den Tillaar, R. y Ettema, G. (2007). A Three-Dimensional Analysis of Overarm Throwing in Experienced Handball Players, *Journal of Applied Biomechanics*, 23(1): 12-19. <https://doi.org/10.1123/jab.23.1.12>
- van den Tillaar, R. y Marques, M. (2011). Effects of training on ball release velocity and kinematics in overarm throwing among experienced female handball players. *Kinesiologia Slovenica*, 17, 2, 38–46.
- van den Tillaar, R. y Ettema, G. (2011). A Comparison of kinematics between overarm throwing with 20% underweight, regular, and 20% overweight balls. *Journal of Applied Biomechanics*, 27, 252-257. <https://doi.org/10.1123/jab.27.3.252>
- Wagner, H., Buchecker, M., von Duvillard, S. P. y Müller, E. (2010). Kinematic description of elite vs. low level players in team-handball jump throw. *Journal of Sports Science & Medicine*, 9(1), 15–23. <https://www.researchgate.net/publication/258035560>

- Wagner, H., Pfusterschmied, J., von Duvillard, S. P. y Müller, E. (2011). Performance and kinematics of various throwing techniques in team-handball. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10(1), 73–80. PMID: PMC3737895
- Wood, G. A. y Jennings, L. S. (1979). On the use of spline functions for data smoothing. *Journal of Biomechanics*, 12, 477-479, Doi:10.1016/S0021-9290(99)00083-4