

PAPEL DE LA ELASTICIDAD DEL TENDON EN LA POTENCIA MUSCULAR

Luis Fernando Aragón Vargas, Ph.D.

Memoria del III Simposio en Ciencias del Ejercicio y la Salud
Escuela de Educación Física y Deportes
Universidad de Costa Rica
Octubre de 1996

Esta ponencia fue originalmente presentada durante el I Simposio Internacional en Ciencias del Ejercicio y la Salud, Universidad de Costa Rica, en Octubre de 1994. El documento completo se incluyó en la memoria del III Simposio; ahora se coloca en este repositorio el documento completo para beneficio de los lectores. Se discute en éste el papel que juega la elasticidad del tendón en la generación de potencia muscular, la cual se ha visto que no solamente depende de la capacidad contráctil de las fibras musculares.

"Si ejecutamos dos saltos verticales consecutivos haciendo cada vez un esfuerzo máximo, siempre sucede que el segundo salto es más alto que el primero. El almacenamiento de trabajo en los músculos tensos provee, desde el inicio del segundo salto, una fuerza elástica sumamente alta que, en contraste, el músculo desarrolló sólo gradualmente durante el primer salto".

(Marey & Demeny 1885, pág. 494)

Hace ya más de un siglo que Marey y Demeny escribieron estas líneas, y la fascinación de los entrenadores y atletas con este fenómeno, lejos de disminuir, ha

aumentado. En las últimas tres décadas se le ha dado el nombre de "ejercicios pliométricos" a aquellos ejercicios en los que el músculo se ve estirado forzosamente durante la contracción (acción excéntrica), inmediatamente antes de la acción concéntrica que produce el movimiento de interés. Más técnicamente, este tipo de movimientos puede ser llamado "Ciclos de Estiramiento-Acortamiento" (CEA) (Bosco et al. 1982). Conforme se alcanza un mejor entendimiento de la mecánica de las unidades musculotendinosas que generan el movimiento, se llega a la conclusión de que la explicación tradicional de los efectos del entrenamiento pliométrico es demasiado simplista. Más aún, el papel de la elasticidad en las acciones



musculares no se limita a aquellos movimientos de tipo CEA. Este artículo discute primero los principios mecánicos de la acción muscular, refiriéndose luego a los movimientos pliométricos y sus características.

Mecánica muscular.

La contracción muscular tiene una serie de características que es necesario entender antes de analizar el papel de la elasticidad del tendón. Un principio del funcionamiento muscular que es bastante conocido es el de la curva fuerza-velocidad (Figura 1). Esta curva fue elaborada mediante la estimulación de fibras aisladas, realizando contracciones **isotónicas** contra diferentes cargas o resistencias. La curva muestra que el músculo se acorta a máxima velocidad cuando no hay una carga que se le oponga. Conforme mayor es la carga que debe levantar, menor es la velocidad de acortamiento de las fibras musculares. Esto también puede verse al revés: si la fibra no necesita acortarse tan rápido, puede hacerlo contra una carga mayor. Al seguir aumentando la carga, el músculo llega a una contracción isométrica, donde no hay acortamiento de las fibras. Esto se conoce como **Po**, la fuerza máxima que se puede

desarrollar isométricamente. Si la carga aumenta más allá de P_o , el músculo se ve estirado forzosamente, lo cual se conoce como una contracción excéntrica. Nótese que la fuerza que puede generar la fibra muscular en una contracción excéntrica es considerablemente más alta que P_o . Los fenómenos observables en la curva fuerza-velocidad son independientes de la elasticidad del tendón, por tratarse de contracciones isotónicas.

¿Qué papel juega el tendón en las acciones musculares? El tendón transmite la fuerza generada por las fibras musculares a los huesos. Sin embargo, el tendón no es un cable rígido, sino más bien un tejido elástico que se deforma proporcionalmente a la fuerza que se le aplica. El grado de deformación depende de la elasticidad, o de su contraparte, la rigidez. Para efectos de este artículo, se puede utilizar una versión simplificada del modelo muscular de Hill e ilustrar el complejo músculo tendón como un modelo que tiene un elemento contráctil (las fibras musculares, o más específicamente los sarcómeros) armado en serie con un elemento elástico pasivo (el tejido conectivo) (Figura 2).



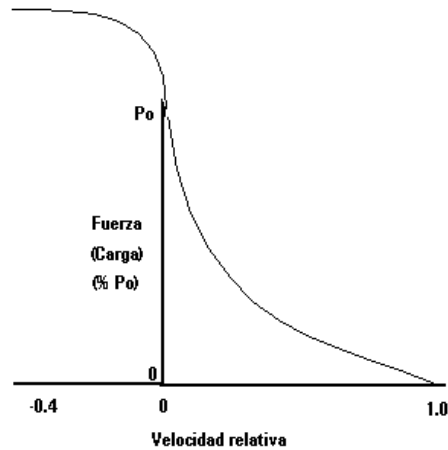


Figura 1. Curva de la fuerza/velocidad del músculo esquelético obtenida de contracciones isotónicas en fibras aisladas.

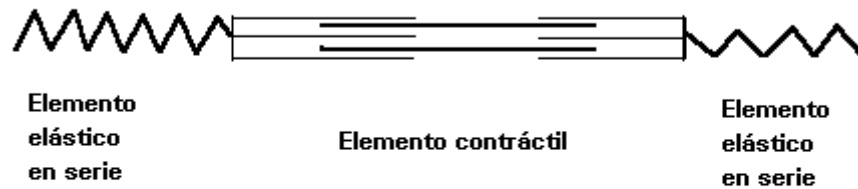


Figura 2. Esquema del complejo músculo-tendón.

Este diseño tiene varias implicaciones sobre el funcionamiento muscular *in vivo*. En primer lugar, el rango de operación de la unidad músculotendinosa se ve aumentado por un tendón flexible, ya que parte del cambio de longitud que debería ser asumido por las fibras musculares es de hecho asumido por el tendón (Lieber 1992). En segundo lugar, la velocidad de acortamiento del complejo músculo-tendón es a menudo diferente a la velocidad de acortamiento de las fibras.

Bobbert et al. (1986) proponen un modelo según el cual se mediría la velocidad de acercamiento entre el origen y la inserción del músculo (V_{OI}) independientemente de la velocidad de acortamiento de las fibras. Quizás el papel del tejido tendinoso puede apreciarse mejor en las palabras del famoso fisiólogo A.V. Hill:

"El componente elástico pasivo que está en serie con el componente contráctil ... actúa



como un amortiguador cuando el músculo pasa abruptamente del estado de reposo a la actividad, y acumula energía mecánica conforme aumenta la tensión en el músculo. Si al músculo se opone, como en la mayoría de los movimientos comunes y corrientes, la inercia de una extremidad o de una masa externa, la energía mecánica puede utilizarse para producir una velocidad final mayor que aquélla a la cual se puede acortar el componente contráctil propiamente dicho. Esto es importante en movimientos como los saltos y los lanzamientos".

(Hill 1950)

La aplicación de los conceptos básicos de mecánica muscular a la acción deportiva representa un reto enorme. Por ejemplo, Bobbert et al. (1986) plantean que si se aplicara el concepto de la curva fuerza-velocidad a las pruebas isokinéticas de extensión de la rodilla y de flexión plantar, extrapolando los resultados obtenidos hacia velocidades más altas que las permitidas por los aparatos que normalmente se utilizan, se concluiría que no es posible obtener torques más allá de una velocidad angular de 6.8 rad/s en flexión plantar, ni más allá de 12.5 rad/s en extensión de la rodilla. Sin embargo, en movimientos complejos (multiarticulares) como el salto vertical, los músculos responsables de la flexión plantar y la extensión de la rodilla son capaces de ejercer torques aún a la velocidad de 16 rad/s (van Soest et al. 1985). ¿Cómo es esto posible?

La figura 3 muestra una adaptación del modelo utilizado por Bobbert y colaboradores (1986). Es posible observar en la figura que el gastrocnemio es un músculo biarticular, esto es, que cruza dos articulaciones desde su origen hasta su inserción. Por esta razón, el gastrocnemio actúa como músculo motor o agonista tanto en la flexión de la rodilla como en la flexión plantar ("extensión") del tobillo. Durante la fase positiva de un salto vertical (cuando las articulaciones se están extendiendo), el gastrocnemio tiende a acortarse al producir flexión plantar, pero tiende a alargarse en virtud de la extensión de la rodilla. Esto permite que, a la misma velocidad angular de flexión plantar, la V_{OI} sea menor durante el salto que durante la flexión plantar isokinética, lo cual a su vez permite que las fibras musculares se mantengan dentro del rango de velocidad en que aún pueden ejercer tensión.

El modelo de la figura 3 también permite apreciar la importancia del tejido tendinoso en el músculo gastrocnemio. En este músculo, el tendón representa aproximadamente un 60 a 70% de la longitud total de la unidad músculo-tendón. Esto significa que las características del tendón van a ser sumamente importantes en las acciones de este músculo. La velocidad de acortamiento del elemento contráctil del gastrocnemio es aún más baja durante el salto vertical gracias a la gran cantidad de tejido tendinoso en serie con las fibras musculares. Bobbert et al. (1986) muestran cómo, sin un tendón elástico, no sería posible desarrollar torques a altas velocidades de flexión plantar.



Esta observación ha sido corroborada por Bobbert y van Ingen Schenau (1990).

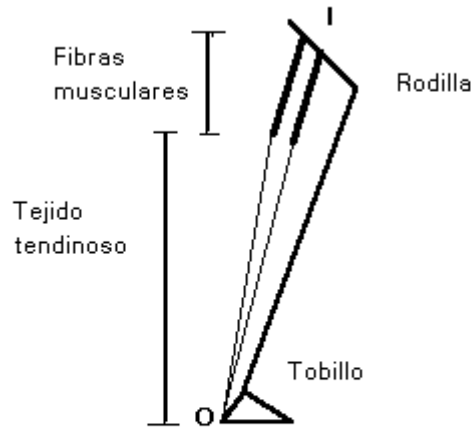


Figura 3. Modelo del músculo gastrocnemio (adaptado de Bobbert et al. 1986: "A model of the human triceps surae muscle-tendon complex applied to jumping" J. Biomech. 19 (11):887-898).

La observación de Hill citada anteriormente tiene, por lo tanto, una gran profundidad: la potencia desarrollada por el músculo en una acción articular depende del producto de la velocidad angular de la articulación y el torque generado por la unidad músculo-tendón, según la fórmula:

$$\dot{W} = M \cdot \omega$$

Como la velocidad de acortamiento de las fibras musculares es menor que V_{OI} debido a la gran velocidad de acortamiento del tendón, es posible desarrollar torques altos a altas velocidades, lo cual aumenta la potencia mecánica de la articulación.

El ciclo de estiramiento-acortamiento

Este tipo de movimiento, característico de los ejercicios pliométricos, produce efectos específicos sobre la acción muscular. Uno de los resultados más evidentes es que el músculo sometido a un CEA es capaz de acortarse contra una carga mayor que P_0 (Cavagna et al. 1968), lo cual demuestra que no sólo ocurre almacenamiento y reutilización de energía elástica sino también una modificación en la contractilidad muscular inducida por el estiramiento previo (Cavagna, 1977). También se ha sugerido que existe una potenciación del reflejo de estiramiento (Bosco et al. 1982). El CEA ha sido descrito por Cavagna:

"Durante el trabajo negativo, cuando el músculo es estirado forzadamente, el músculo absorbe energía mecánica; esta energía



puede disiparse en forma de calor o puede almacenarse en el músculo. A su vez, la energía mecánica almacenada puede ser degradada en forma de calor (esto es, si el músculo se relaja) o puede ser reutilizada inmediatamente después durante el acortamiento activo del músculo. En este último caso, el trabajo positivo realizado por los músculos durante el acortamiento se derivaría (a) de la transformación de energía química en trabajo mecánico por la maquinaria contráctil y (b) de la energía mecánica previamente almacenada en el músculo y tendón durante la fase negativa del trabajo. La cantidad de energía mecánica almacenada y reutilizada depende de la mecánica del ejercicio".

(Cavagna 1977, pág. 89).

La "mecánica del ejercicio" a que se refiere Cavagna consiste en una serie de características que se han podido identificar con claridad. En primer lugar, es indispensable que los músculos activos sean estirados forzosamente **inmediatamente** antes de su acortamiento, ya que conforme transcurre el tiempo, la tensión cae y la energía elástica almacenada se pierde. También se sabe que conforme mayor sea la fuerza, tanto mayor será el estiramiento de los elementos elásticos, y en consecuencia la cantidad de energía elástica almacenada. Más aún, el efecto de la utilización de energía elástica almacenada es tanto mayor cuanto menor es la amplitud del movimiento. Finalmente, el efecto principal sobre la acción muscular puede ser de dos tipos:

si el movimiento ocurre contra una masa constante, como en el caso del salto vertical, el efecto del estiramiento es una mayor aceleración de la masa, reduciendo el tiempo necesario para ejecutar el trabajo (aunque el total de trabajo mecánico se mantiene relativamente constante); si el movimiento ocurre a una velocidad y amplitud constantes (como en los experimentos de Cavagna et al. 1968), el estiramiento previo permite una cantidad mayor de trabajo positivo realizado.

Existen argumentos a favor y en contra de la existencia de almacenamiento y reutilización de la energía elástica. Entre los argumentos favorables, además de los ya presentados, existe uno sumamente fuerte: el de la eficiencia del trabajo físico. Se ha demostrado claramente que cuando un ejercicio involucra ciclos repetidos de estiramiento-acortamiento, como al saltar a la cuerda o correr en terreno horizontal, el costo energético del trabajo es mucho menor que lo esperado (Cavagna 1977). La explicación brindada por muchos autores es que parte de la energía gastada en un movimiento (p.ej. cuando se impulsa el cuerpo hacia arriba) se puede recuperar en la fase excéntrica del movimiento siguiente (cuando el cuerpo cae y estira forzosamente los músculos), siendo almacenada y reutilizada inmediatamente después. La eficiencia se aumenta, por lo tanto, considerablemente.

El otro argumento frecuentemente utilizado a favor de la utilización de energía elástica almacenada tiene que ver con la altura



obtenida por saltos verticales de distintos tipos. Quizás el estudio más comúnmente citado sobre este tema es el experimento de Asmussen & Bonde-Petersen (1974). Estos autores utilizaron 19 sujetos que realizaron cinco tipos de salto vertical: salto agachado (SA), donde iniciaban el movimiento ya en posición agachada y sin impulso contrario; salto con impulso contrario (SIC), usando un movimiento natural de estiramiento-acortamiento; salto con caída 1 (SCC_1) desde 233 mm; salto con caída 2 (SCC_2) desde 404 mm, y salto con caída 3 (SCC_3) desde 690 mm de altura. Ellos calcularon la altura del salto a partir del tiempo de vuelo de cada sujeto, y concluyeron que la altura del salto es mayor en los saltos que tienen un ciclo de estiramiento-acortamiento, comparada con la altura del SA. Además, la altura del salto fue mayor conforme mayor era la energía cinética en la fase negativa del salto, pero sólo hasta llegar a SCC_2 , ya que en SCC_3 obtuvieron una altura menor otra vez. Este aumento en la velocidad vertical de despegue y en la altura del salto conforme existe una mayor energía cinética en la fase negativa (estiramiento) del salto, es consistente con la teoría de utilización de energía elástica almacenada. Komi & Bosco (1978) obtuvieron resultados parecidos en un estudio con hombres y mujeres de varios niveles de actividad física.

Sin embargo, hay algunos problemas con estos resultados. En un experimento semejante al de Asmussen & Bonde-Petersen mencionado en el párrafo anterior, Bobbert y colaboradores (1987b) evaluaron los efectos mecánicos de saltos con caída desde diferentes

alturas (20, 40 y 60 cm). Ellos concluyeron que la altura del salto no cambia según el tipo de SCC utilizado. La duración de la fase positiva del salto tampoco cambió según lo esperado (a mayor altura de la caída, la duración debió ser menor). En otro experimento llevado a cabo por Yamazaki y colaboradores (1989), los sujetos saltaron con las caderas y rodillas "trancadas", es decir, que el salto solamente fue impulsado por la flexión plantar en el tobillo. Ellos comprobaron que el salto SA puede ser mejorado no sólo usando un movimiento de impulso contrario (SIC), sino también manipulando la tensión que existe en los músculos agonistas en forma estática. De estos dos experimentos se desprende la teoría de que lo importante en un salto vertical no es necesariamente que haya almacenamiento y reutilización de energía elástica, sino también que haya una alta tensión musculotendinosa al inicio de la fase positiva del salto tal y como habían propuesto Heitler & Burrows (1977a y 1977b).

En una revisión de la literatura bastante exhaustiva, van Ingen Schenau (1984) presenta una crítica bastante fuerte a la utilización de energía elástica almacenada como única explicación de la mayor cantidad de trabajo realizada por el músculo que ha sido estirado forzosamente. Entre otros argumentos, demuestra que la cantidad de energía elástica que se puede almacenar en la unidad músculo-tendón simplemente no es suficiente para explicar todo el trabajo adicional que el músculo puede realizar. También demuestra cómo los resultados obtenidos en algunos otros experimentos no son consistentes con la teoría de



utilización de energía elástica almacenada.

En conclusión, se puede decir que los movimientos de impulso contrario o CEA, producen por lo general una contracción muscular más fuerte y una acción mecánicamente más potente, pero no está claro que este fenómeno se pueda atribuir únicamente al almacenamiento de energía elástica en la unidad músculo-tendón. ¡A pesar de desconocer los detalles, la observación de Marey & Demeny citada al principio de este trabajo fue notablemente acertada! La elasticidad del tendón también cumple otros papeles durante el movimiento, como afectar la potencia mecánica al permitir que el acercamiento entre el origen y la inserción de un músculo tenga una velocidad mayor que la velocidad de acortamiento de las fibras musculares, y permitir un rango de movimiento mayor a las articulaciones. En todas estas funciones, un tendón menos rígido (más elástico) favorecería la performance del músculo al cual está unido, permitiendo una mayor potencia en la ejecución de los movimientos.

Referencias

- Asmussen E, & Bonde-Petersen F. (1974). Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiologica Scandinavica*, 91(3), 385-392.
- Bobbert MF, Huijing PA, & van Ingen Schenau GJ. (1986). A model of the human triceps surae muscle-tendon complex applied to jumping. *Journal of Biomechanics*, 19(11), 887-898.
- Bobbert MF, Huijing PA, & van Ingen Schenau GJ. (1987a). Drop jumping. I. The influence of jumping technique on the biomechanics of jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19(4), 332-338.
- Bobbert MF, Huijing PA, & van Ingen Schenau GJ. (1987b). Drop jumping. II. The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19(4), 339-346.
- Bobbert MF, & van Ingen Schenau GJ. (1990). Mechanical output about the ankle joint in isokinetic plantar flexion and jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(5), 660-668.
- Bosco C, Komi PV, & Ito A. (1981). Prestretch potentiation of human skeletal muscle during ballistic movement. *Acta Physiologica Scandinavica*, 111(2), 135-140.
- Bosco C, Viitasalo JT, Komi PV, & Luhtanen P. (1982). Combined effect of elastic energy and myoelectrical potentiation during stretch-shortening cycle exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 114(4), 557-565.
- Cavagna GA. (1977). Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 5, 89-129.
- Cavagna GA, Dusman B, & Margaria R. (1968). Positive work done by a previously stretched muscle. *Journal of Applied Physiology*, 24(1), 21-32.



- Heitler WJ, & Burrows M. (1977a). The locust jump. I. The motor programme. *Journal of Experimental Biology*, 66(1), 203-219.
- Heitler WJ, & Burrows M. (1977b). The locust jump. II. Neural circuits of the motor programme. *Journal of Experimental Biology*, 66(1), 221-241.
- Hill AV (1950). The series elastic component of muscle. *Proceedings of the Royal Society, London, Ser. B* 137:273-280. (Citado por Cavagna 1968).
- Komi PV, & Bosco C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Medicine and Science in Sports*, 10(4), 261-265.
- Lieber RL. (1992). *Skeletal muscle structure and function*. Baltimore, MD: Williams & Wilkins.
- Marey M, & Demeny MG. (1885). Locomotion humaine, mécanisme du saut. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)*, 101, 489-494 (citado por Cavagna, 1977).
- van Ingen Schenau GJ. (1984). An alternative view to the concept of utilization of elastic energy in human movement. *Human Movement Science*, 3, 301-336.
- van Ingen Schenau GJ. (1989). From rotation to translation: constraints on multi-joint movements and the unique action of bi-articular muscles. *Human Movement Science*, 8, 301-337.
- van Soest AJ, Roebroek ME, Bobbert MF, Huijing PA, & van Ingen Schenau GJ. (1985). A comparison of one-legged and two-legged countermovement jumps. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17, 635-639.
- Yamazaki Y, Suzuki M, & Mano T. (1989). Performance of noncountermovement jump with both knee and hip joints fully extended. *Journal of Applied Physiology*, 66(4), 1976-1983.

