Revista de Entrenamiento Deportivo, (Rev Entren Deport / J Sports Training) 2012, 26(2)

Article

El Comportamiento Elástico en Serie Durante el Ciclo de Estiramiento-Acortamiento

Series Elasticity Behavior During the Stretch-Shortening Cycle

Francis Goubel

Departamento de Bioingeniería, Universidad de Tecnología de Compiègne (Francia).

RESUMEN

El artículo es un examen pertinente de las controversias acerca del papel desempeñado por la energía elástica en el ciclo de estiramiento-acortamiento (SSC). Los autores han realizado un excelente trabajo al reunir datos de humanos y animales en los que la discrepancia se debe a menudo a la diferencia en el nivel de observación. La parte dedicada a la eficiencia en SSCs repetitivos es convincente. Goubel se refiere a «Does elastic energy enhance work and efficiency in the stretch-shortening cycle?» (JAB, 1997, 13, 389- 415), en el que sus autores abordan el papel del almacenamiento y reutilización de energía elástica en los ciclos de estiramiento-acortamiento, presentando el argumento de que en los movimientos discretos, tales como el salto vertical, la energía elástica no explica el aumento de trabajo debido al pre-estiramiento.

Palabras Clave: estiramiento-acortamiento, energía elástica, potencia, fuerza

ABSTRACT

The article examines the controversies regarding the role played by elastic energy in the stretch-shortening cycle (SSC). The authors have executed an excellent work, bringing together human and animal data in which the discrepancy is often due to the difference in the level of observation. The part dealing with efficiency in repetitive SSCs is convincing. Goubel refers to «Does elastic energy enhance work and efficiency in the stretch-shortening cycle?» (JAB, 1997, 13, 389- 415), in which the authors address the role of storage and reutilization of elastic energy in stretch-shortening cycles while presenting the argument that for discrete movements such as the vertical jump, elastic energy does not explain the work enhancement due to the prestretch.

Keywords: stretch-shortening, elastic energy, power, strength

¿FIBRAS DE CONTRACCIÓN LENTA O DE CONTRACCIÓN RÁPIDA?

Ingen Schenau y otros sugieren que uno de los efectos positivos de un contramovimiento es que concede tiempo a los

músculos para desarrollar la fuerza. Argumentan que el efecto es compatible con el hecho de que los sujetos que poseen un gran porcentaje de fibras de contracción lenta son capaces de aprovecharse mejor de un contramovimiento. A mi juicio, la influencia del tipo de fibra es más compleja. Las fibras de contracción lenta (ST) y las de contracción rápida (FT) pueden beneficiarse de modo diferente del SSC, según la fase del ciclo.

La fase de estiramiento: La mejora de la actuación que caracteriza a los ejercicios con SSC se ha atribuido al almacenamiento de energía elástica en el complejo músculo-tendón durante el estiramiento. Analizando el contramovimiento en los saltos verticales, Bosco, Tihanyi, Komi, Fekete y Apor (1982) demostraron que aquellos sujetos con más fibras FT en su vasto lateral se beneficiaban más de la fase de estiramiento efectuada con pequeños desplazamientos angulares. Se suponía que la energía se almacenaba más eficientemente en las fibras FT debido a una posibilidad de desarrollar una mayor fuerza hasta el final del estiramiento.

Sin embargo, la exacta cantidad de energía almacenada es una función de la rigidez de los elementos elásticos, y algunos resultados sugieren que las fibras ST y FT bien pueden tener diferentes características elásticas. Esto se reveló primero en el trabajo de Wells (1965), que mostró que el denominado componente elástico en serie (SEC) de un músculo de la rata con fibras en su mayor parte ST (sóleo) era más rígido que el de un músculo con un importante porcentaje de fibras FT (tibial anterior). Desgraciadamente, la organización anatómica de esos músculos es bastante diferente, y no puede excluirse una explicación alternativa de las diferencias observadas en función de la variación en la relación entre la longitud del tendón y la longitud total del músculo (Close, 1972). En mi laboratorio intentamos resolvemos este problema induciendo las transiciones del tipo de fibra en el músculo sóleo de la rata corno respuesta al ejercicio. Demostrarnos que, cuando una técnica de entrenamiento incrementa el porcentaje de fibras FT, disminuye la rigidez del SEC (Almeida-Silveira, Pérot, Pousson & Goubel, 1994; Pousson, Pérot & Goubel, 1991).

El cambio mecánico opuesto (es decir, un incremento en la rigidez del SEC) también estaba asociado con un relativo aumento de las fibras ST (Goubel & Marini, 1987). Tales resultados están de acuerdo con los de Petit, Filippi, Emonet-Denand, Hunt y Laporte (1990), que encontraron que en el largo del peroné del gato, las unidades motrices ST tenían una mayor rigidez dinámica que las unidades motrices FT. Por otra parte, los datos obtenidos sobre las fibras FT y ST desolladas no indican ninguna diferencia en las características elásticas de los puentes cruzados de cualquier isoforma de la cadena pesada de miosina (Galler, Hilber & Pette, 1996). Sin embargo, se han mostrado, mediante análisis sinusoidal, diferencias en la rigidez compleja entre las fibras ST y FT (Kawai & Schachat, 1984). También es concebible que las estructuras elásticas en serie con fibras ST sean más rígidas que aquéllas en serie con fibras FT. Esto podría explicar las discrepancias en los resultados obtenidos con diferentes niveles de observación (fibra desollada versus músculo completo). Sin embargo, esto implicaría una organización anatómica de la parte pasiva del SEC, lo que es improbable considerando la dispersa distribución de las fibras.

Sea eso como fuera, cuando un músculo tiene una gran proporción de fibras FT, su SEC parece relativamente flexible. Esto no favorece necesariamente el almacenamiento de energía ya que un SEC más rígido mejoraría la transmisión de la fuerza (ver más adelante).

El tiempo de conexión: El tiempo de conexión (es decir, el tiempo transcurrido entre el estiramiento y el acortamiento) es importante para la “eficiencia” del SSC. La energía almacenada puede disiparse en calor si el tiempo de conexión no es bastante corto. Además, parte de la energía potencial se almacena en los puentes cruzados mientras permanecen en el estado vinculado. Entonces, puede suponerse que un tiempo de conexión más corto que la vida del puente cruzado llevará a una mejor utilización de la energía potencial (Bosco, 1982). Esto subraya la influencia del tipo de fibra, ya que el ritmo del ciclo del puente cruzado es mayor en las fibras FT que en las fibras ST. En consecuencia, un SSC con un tiempo de conexión relativamente largo favorecerá a los músculos en los que predominan las fibras ST. Esas fibras serán capaces de retener su energía potencial ya que la separación de los puentes cruzados puede que no se produzca.

La fase de acortamiento: Durante esta fase, en la que el músculo genera el trabajo mecánico, una parte de la energía puede proceder de la liberación de la energía potencial anteriormente almacenada en el SEC. Es evidente que este rechazo de la energía elástica depende de la cantidad almacenada durante la fase de estiramiento. Entonces, en función de la influencia del tipo de fibra, lo mismo vale para ambas fases. Además, Bosco y otros (1982) informaron que para pequeños desplazamientos angulares, el porcentaje de rechazo de la energía potencial no dependía de la composición del tipo de fibra. Sin embargo, este porcentaje era mayor en los sujetos ricos en fibras ST cuando se efectuaban los saltos con grandes desplazamientos angulares. Este resultado se interpretó en función de la pérdida de energía potencial en los puentes cruzados desligados de las fibras FT. Por otra parte, puede suponerse que el rápido acortamiento debido a la activación de las fibras FT mejoraría el fenómeno del rechazo gracias a una rápida caída de la tensión durante la fase de acortamiento. Resultados recientes sobre la determinación de la eficiencia durante una serie de SSCs del gastrocnemio de la rata no confirman esta hipótesis (Ettema, 1996).

¿SE ALARGAN LAS FIBRAS MUSCULARES DURANTE LA FASE DE ESTIRAMIENTO?

Ingen Schenau y otros indican la bien documentada mejora de la fuerza durante el estiramiento en músculos aislados tetanizados y en fibras musculares sencillas. Este fenómeno también está presente en el músculo humano. Para el músculo eléctricamente estimulado en los humanos, es evidente que estirar el músculo durante el tétanos isométrico genera fuerza extra. En el primer músculo interóseo dorsal, se indican fuerzas 1.76 veces el valor isométrico para velocidades de estiramiento de 1.08 de la longitud del complejo músculo-tendón por segundo (Cook & McDonagh, 1993). Del mismo modo, cuando se estiran los flexores del codo durante la máxima contracción voluntaria, pueden obtenerse fuerzas 1.6 veces el valor isométrico (Lensel-Corbeil, Goubel, Gerbeaux & Pertuzon, 1992). Aun así, coincido en que queda por probarse que las fibras musculares se alargan durante SSCs que se producen de forma natural.

En los animales, se han registrado cambios en la longitud de las fibras musculares usando una técnica del tiempo de tránsito del ultrasonido. Por consiguiente, Griffiths (1991) fue capaz de estudiar el efecto de estiramientos a velocidad de lenta a media sobre el gastrocnemio medial activo del gato. Demostró que para actividades correspondientes a caminar y trotar, el alargamiento se producía enteramente en los tendones: Las fibras musculares realmente se acortaban durante todo el estiramiento impuesto. Entonces, hace falta investigar de nuevo el papel de los husos musculares durante tales ejercicios. Sin embargo, como señaló Komi (1990), sería más importante ampliar este tipo de estudio a las situaciones experimentales que producen mayor rigidez muscular que esos remedos de caminar y trotar.

Por lo que a los movimientos humanos se refiere, los datos experimentales son escasos (Winters, 1990). Que yo sepa, la conclusión de que las fibras musculares se acortan cuando se alarga el complejo músculo-tendón de los humanos se dedujo de estudios de simulación. Tales resultados dependen necesariamente de estimaciones algo toscas de las características del SEC. Por ejemplo, un cuidadoso examen de la Figura 6 de Belli y Bosco (1992) demuestra que una leve modificación del valor numérico para la rigidez del SEC podría llevar al resultado opuesto (es decir, un alargamiento del componente contráctil). Hace falta un trabajo adicional para estar seguro de que las fibras musculares no se alargan durante el SSC. Entonces se rechazará claramente la potenciación durante la fase de estiramiento.

SEC: ¿FLEXIBLE O RÍGIDO?

A veces se pretende que es necesario un SEC flexible para la máxima utilización de la energía de tendencia elástica. Como indicaron Ingen Schenau y otros, esta idea llevó a Wilson, Wood y Elliott (1991) a proponer el entrenamiento de la FLexibilidad para mejorar la capacidad para almacenar energía elástica. Sin embargo, Pousson, Van Hoecke y Goubel (1990) hallaron un incremento en la rigidez del SEC cuando estudiaron el efecto del entrenamiento excéntrico sobre los flexores del codo humano. Dado que el objetivo del entrenamiento es mejorar el rendimiento, ambos resultados se contradicen entre sí.

De hecho, un incremento en la rigidez tiene dos consecuencias positivas: (a) Durante el estiramiento, puede almacenarse más energía potencial ya que la fuerza es capaz de elevarse rápidamente, y (b) durante el acortamiento, el componente contráctil puede generar más trabajo ya que su acortamiento no está contrarrestado por un SEC flexible. Quedan sin resolver otros problemas. Por ejemplo, si el complejo músculo-tendón se estira más allá del límite elástico de sus puentes cruzados, la energía extra almacenada en el tendón está limitada por el menor almacenamiento en las fibras musculares. Un incremento en la rigidez de la fibra para grandes niveles de la fuerza evitaría este tipo de problema. Algunos resulta dos obtenidos en fibras aisladas (Bressler, Dusik & Menard, 1988, Colomo, Lombardi & Piazzesi, 1986) y en músculos completos (Goubel & Lensel-Corbeil, 1988; Stienen & Blangé, 1981) están de acuerdo con esta propuesta. Por otra parte, un incremento en la flexibilidad del SEC puede tener algún interés durante la parte inicial de la fase de acortamiento: La consecutiva reducción en la velocidad de acortamiento permitirá al componente contráctil desarrollar una mayor fuerza gracias a la relación fuerza-velocidad.

Finalmente, la solución mejor sería una adaptación de las características del SEC según la fase del SSC. Como mencionaron Cavagna, Citterio y Jacini (1981), puede proponerse que durante un SSC, el SEC tiende a satisfacer dos requisitos opuestos: (a) un incremento en la rigidez durante el estiramiento que favorecerá una mejor transmisión de la fuerza y reducirá el tiempo de conexión, y (b) una disminución en la rigidez durante el acortamiento que permitirá una liberación mejor de la energía potencial. El “efecto Cavagna” (el verdadero incremento en la flexibilidad durante el rechazo del SEC) fue indicado en primer lugar en los músculos de ranas y sapos (Cavagna & Citterio, 1974). Como demostraron Lensel y Goubel (1987), para que se produzca el efecto Cavagna, un gran estiramiento debe estar seguido por una

liberación dada de una longitud que supera en un 15% a la longitud con la tensión isométrica máxima. En vista de estas limitaciones, es dudosa la utilidad del efecto Cavagna para el movimiento humano (Hof, Geelen & Van Den Berg, 1983; Lensel-Corbeil & Goubel, 1990).

CONCLUSIÓN

Para garantizar que el almacenamiento y reutilización de la energía elástica puede excluirse como una explicación para la mejora del trabajo durante el SSC, son necesarios datos experimentales más concluyentes. En la literatura, la mayoría de los datos son contradictorios. Esto se debe sobre todo porque los resultados obtenidos con un nivel dado de observación y usando un protocolo determinado no permiten una generalización sistemáticamente amplia. Por consiguiente, no es fácil adoptar una posición clara en algunas controversias. Sea eso corno fuera, este artículo objetivo será muy útil para todo el que trabaja en el campo de la mecánica muscular.

REFERENCIAS

1. Almeida-Silveira, M.I., Perot, C., Pousson, M., & Goubel, F. (1994). Effects of stretch-shortening cycle training on mechanical properties and fibre type transition in the rat soleus muscle. *Pflügers Archiv, 427, 289-294.*
2. Belli, A., & Bosco, C. (1992). Influence of stretch-shortening cycle on mechanical behaviour of triceps surae during hopping. *Acta Physiologica Scandinavica, 144,401-408.*
3. Bosco, C. (1982). Stretch-shortening cycle in skeletal muscle function with special reference to elastic energy and potentiation of myoelectrical activity. *Studies in Sport, Physical Education and Health. Volume 15. University of Jyväskylä, Finland.*
4. Bosco, C., Tihanyi, J., Komi, P.V., Fekete, G., & Apor, P. (1982). Store and recoil of elastic energy in slow and fast types of human muscles. *Acta Physiologica Scandinavica, 116, 343- 349.*
5. Bressler, B.H., Dusik, L.A., & Menard, M.R. (1988). Tension responses of frog skeletal muscle fibres to rapid shortening and lengthening steps. *Journal of Physiology, 307, 631-641.*
6. Cavagna, G.A., & Citterio, G. (1974). Effect of stretching on the elastic characteristics and the contractile component of frog striated muscle. *Journal of Physiology, 239, 1-14.*
7. Cavagna, G.A., Citterio, G., & Jacini, P. (1981). Effects of speed and extent of stretching on the elastic properties of active frog muscle. *Journal of Experimental Biology, 91, 131-143.*
8. Close, R.I. (1972). Dynamic properties of mammalian skeletal muscle. *Physiological Reviews, 52, 129-197.*
9. Colomo, F., Lombardi, V., & Piazzesi, G. (1986). The relation between force, stiffness and velocity of lengthening in “tendonfree” segments of frog single muscle fibres. *Journal of Physiology, 377, 90P.*
10. Cook, C.S., & McDonagh, M.J.N. (1993). Force responses to controlled stretches of electrically stimulated muscle in man. *Journal of Physiology, 467, 211 P.*
11. Ettema, G.J.C. (1999). Mechanical efficiency and efficiency of storage and release of series elastic energy in skeletal muscle during stretch-shorten cycles. *Journal of Experimental Biology, 199, 1983-1997.*
12. Galler, S., Hilber, K., & Pette, D. (1996). Force responses following stepwise length changes of rat skeletal muscle fibre types. *Journal of Physiology, 493, 219-227.*
13. Goubel, F, & Marini, J.F (1987). Fibre type transition and stiffness modification of soleus muscle of trained rats. *Pflügers Archiv, 410, 321-325.*
14. Goubel, F, & Marini, J.F (1987). Fibre type transition and stiffness modification of soleus muscle of trained rats. *Pflügers Archiv, 410, 321-325.*
15. Goubel, F, & Lensel-Corbeil, G. (1988). Stiffness changes during ramp stretches in frog sartorius muscle as studies by shortening or lengthening steps. *Journal of Physiology, 406, 47P.*
16. Griffiths, R.I. (1991). Shortening of muscle fibres during stretch of the active cat medial gastrocnemius: The role of tendon compliance. *Journal of Physiology, 436, 219-236.*
17. Hof, A.L., Geelen, B.A., & Van Den Berg, J.W. (1983). Calf muscle moment, work and efficiency in level walking: Role of series elasticity. *Journal of Biomechanics, 16, 523-537.*
18. Ingen Schenau, G.J. van, Bobbert, M.F, & Haan, A. de. (1997). Does elastic energy enhance work and efficiency in the stretch-shortening cycle?. *Journal of Applied Biomechanics, 13, 389- 415.*
19. Kawai, M., & Schachat, F.H. (1984). Differences in the transient response of fast and slow skeletal muscle fibers. *Biophysical Journal, 45, 1145-1151.*
20. Komi, P.Y. (1990). Relevance of in vivo force measurements to human biomechanics. *Journal of Biomechanics, 23(Suppl. I), 23- 34.*
21. Lensel, G., & Goubel, F (1987). Muscular compliance and human movement: Limits of the “Cavagna effect”. *In B. Jonsson (Ed.), Biomechanics X-A. Champaign, IL: Human Kinetics.*
22. Lensel-Corbeil, G., & Goubel, F (1990). Series elasticity in frog sartorius muscle subjected to stretch shortening cycles. *Journal of Biomechanics, 23,121-126.*

23. Lensel-Corbeil, G., Goubel, F, Gerbeaux, M., & Pertuzon, E. (1992). Elasticité musculaire et étirement. Apports respectifs de l'experimentation sur muscles in situ et in vitro [Muscle elasticity and stretching: Respective contributions of in situ and in vitro experiments]. *In M. Laurent, J.F Marini, & P. Therme (Eds.), Recherches en A.P.S (pp. 353-367). Paris: Actio.*
24. Petit, J., Filippi, G.M., Emonet-Denand, F, Hunt, c.c., & Laporte, Y. (1990). Changes in muscle stiffness produced by motor units of different types in peroneus longus muscle of the cat. *Journal of Neurophysiology, 63,190-197.*
25. Pousson, M., Van Hoecke, J., & Goubel, F (1990). Changes in elastic characteristics of human muscle induced by eccentric exercise. *Journal of Biomechanics, 23, 343-348.*
26. Pousson, M., Perot, c., & Goubel, F (1991). Stiffness changes and fibre type transitions in rat soleus muscle produced by jumping training. *Pflügers Archiv, 419, 127-130.*
27. Stienen, G.J., & Blange, T. (1981). Local movement in stimulated frog sartorius muscle. *Journal of General Physiology, 78,161-171.*
28. Wells, J.B. (1965). Comparison of mechanical properties between slow and fast mammalian muscles.. *Journal of Physiology, 178, 252-269.*
29. Wilson, G.J., Wood, G.A., & Elliott, B.C. (1991). Optimal stiffness of the series elastic component in a stretch shorten cycle activity. *Journal of Applied Physiology, 70, 825-833.*
30. Winters, J.M. (1990). Hill-based muscle models: A systems engineering perspective. *In J.M. Winters & S.L.Y. Woo (Eds.), Multiple muscle systems (pp. 69-93). New York: Springer-Verlag.*