

Biomecánica clínica

Fuerza, trabajo y potencia muscular

M^a Teresa Angulo Carrere

E.U. de Enfermería, Fisioterapia y Podología. Universidad Complutense de Madrid.
Avenida Ciudad Universitaria s/n. 28040-Madrid
anguloca@enf.ucm.es

Resumen: Concepto de fuerza muscular. Trabajo y potencia muscular.

Palabras clave: Fuerza muscular. Contracción. Actina. Miosina. Tejido conectivo. Trabajo muscular. Potencia muscular.

Abstract: The concept of muscle strength. Muscular' work. Muscle power.

Keywords: Muscular strength. Contraction. Actin. Myosin. Connective tissue. Muscle work. Muscle power.

FUERZA MUSCULAR

Durante la contracción muscular se produce una fuerza interna o tensión que actúa a la vez sobre el origen e inserción del músculo, con una misma magnitud, en la misma dirección pero en sentido convergente. Esta fuerza interna generada durante la contracción, se denomina **fuerza muscular** (Fig. 1). La cantidad de fuerza que se produce en cada contracción está en relación con la capacidad de “trepar” de los filamentos de actina sobre los de miosina, es decir de la cantidad de puentes entre los filamentos de actina y miosina que se generan ⁽¹⁾.

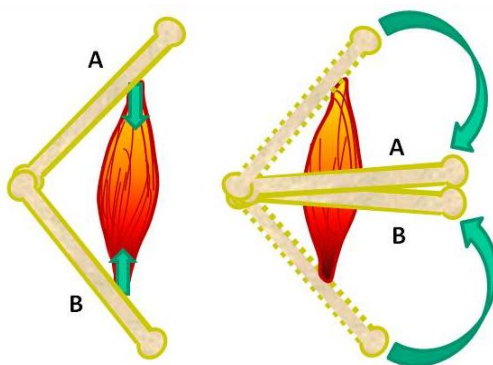


Figura 1. Fuerza de contracción muscular en sentido convergente, aproximando inserción y origen.

Las fibras musculares tipo I (rojas o aeróbicas) generan más fuerza mantenida que las fibras tipo II (claras o anaeróbicas). Debido a esto, los músculos constituidos por un mayor número de fibras tipo I (como los músculos posturales) son capaces de generar mayor fuerza mantenida que los compuestos por un mayor número de fibras tipo II ⁽²⁾.

La fuerza máxima de la fibra muscular se consigue en una longitud determinada y, distinta para cada músculo. Esta situación muscular es llamada **longitud de reposo** (l_0). Se denomina longitud de reposo a, dada una contracción isométrica, la longitud muscular ideal en la cual se desarrolla la tensión máxima. Se corresponde con una longitud de la sarcómera que permite la activación de todos los puentes cruzados entre los filamentos gruesos y finos (miosina y actina). Las fibras musculares pueden contraerse sólo un 60% de su longitud de reposo, de forma que al 75% de la longitud de reposo, las fibras generan sólo un 75% de la fuerza muscular. La capacidad de generar fuerza, por tanto, debería disminuir cuando el músculo es activado a longitudes superiores e inferiores de la longitud de reposo ⁽³⁾.

La capacidad de generar tensión disminuye cuando la fibra muscular se acorta más allá de la mitad de su longitud de reposo (l_0) ⁽⁴⁾. Según se va acortando el músculo durante la contracción, los puentes de actina-miosina se superponen, creando una incompleta activación de las conexiones (se establecen menos puentes actina-miosina). Al final del recorrido del rango de movimiento articular, el músculo está débil y es incapaz de generar grandes cantidades de fuerza (Fig. 2).



Figura 2. Disminución de la fuerza de contracción al producirse el acortamiento muscular por debajo de la longitud de reposo.

Cuando un músculo que está activado (contraído), es estirado un poco más allá de su longitud de reposo (aproximadamente hasta un 20 % más) la tensión muscular generada es mayor que la alcanzada en (l_0). Este hecho se corresponde con una

situación en la que el componente contráctil es óptimo para la producción de fuerza (están activados todos los puentes de actina y miosina) al que, además, se suma el estrés del componente pasivo muscular (tejido conjuntivo) originado por la elongación a la que está siendo sometido el músculo ⁽⁵⁾ (Fig. 3).

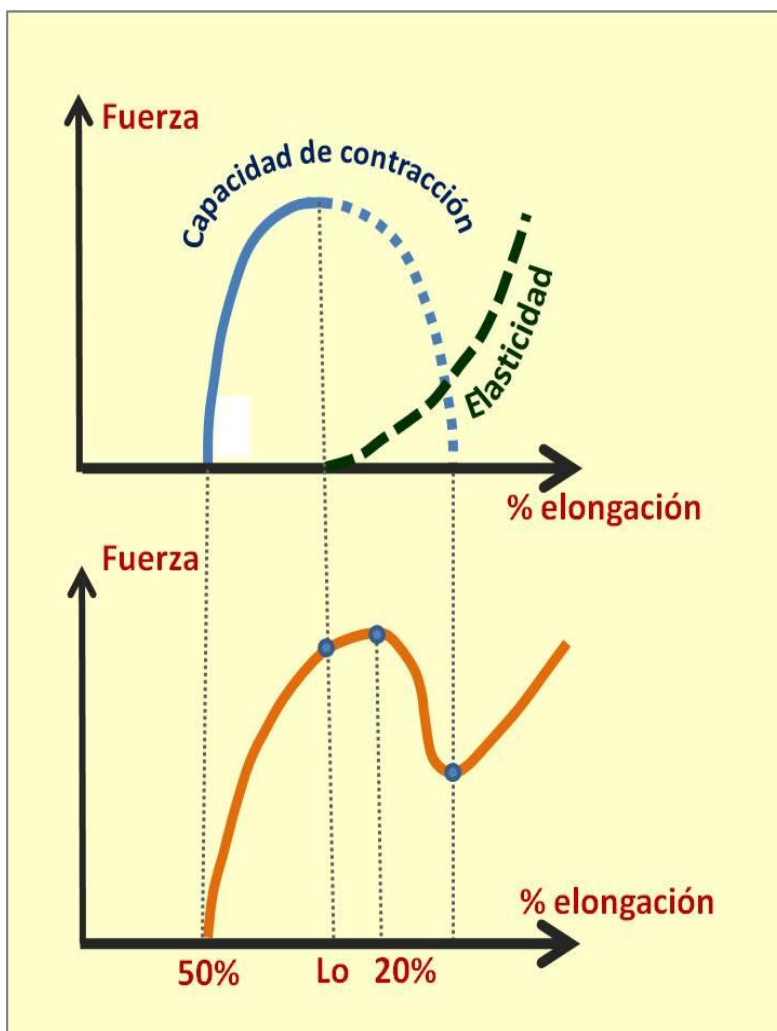


Figura 3. Aumento de la fuerza de contracción al producirse el elongación muscular por encima de la longitud de reposo: tensión de la sarcómera (●), tensión del tejido conjuntivo muscular (●), tensión total (●).

En cambio, cuando se produce una elongación de la fibra muscular por encima de esta longitud (más del 20% de la longitud de reposo) la tensión generada caerá. Esto es debido al deslizamiento y desconexión de los puentes de actina-miosina que se habían establecido, al realizar el estiramiento ⁽⁶⁾. Existe, por tanto, una zona de longitudes óptimas en las que la fuerza muscular generada es máxima ⁽⁷⁾, a partir de esta zona, la fuerza producida es inframáxima (Fig. 4).

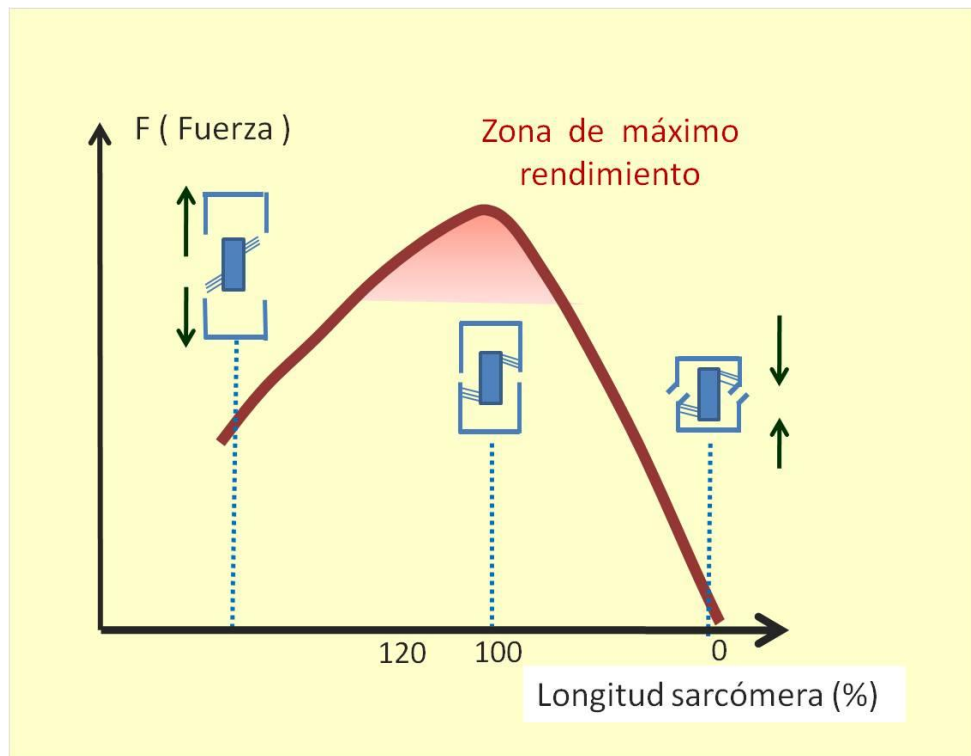


Figura 4. Zona de máximo rendimiento muscular (●) entre la longitud de reposo y el 20% más de la longitud de reposo.

Si tenemos en cuenta los conceptos anteriores, podemos diferenciar tres tipos de estrés o tensión muscular (Fig. 5):

- **Tensión activa:** tensión generada por la contracción y que es ejercida por las sarcómeras del músculo.
- **Tensión pasiva:** tensión generada al estirar un músculo de forma pasiva más allá de su longitud de reposo, generada por los elementos pasivos del músculo (tejido conjuntivo).
- **Tensión total:** es la suma de las dos anteriores. A medida que se estira un músculo más allá de su longitud de reposo la tensión activa disminuye y aumenta la pasiva.

Dependiendo del tipo de contracción realizada por el músculo (isométrica o isotónica) la cantidad de fuerza generada es diferente:

1. **Contracción isométrica:** la fuerza permanece constante. En el caso de situarse en la longitud de reposo, la fuerza muscular generada es máxima y constante.

2. **Contracción concéntrica:** la fuerza generada disminuye según el músculo se acorta. Esta pérdida de fuerza es debida a que se produce un acabalgamiento de los puentes de actina-miosina según progresa la contracción.
3. **Contracción excéntrica:** es el tipo de contracción capaz de generar mayor nivel de fuerza. Esto es debido a la tensión que se origina por elongación del tejido muscular mientras permanecen contraídas las sarcómeras y todos los puentes entre los filamentos de actina y miosina están activados.

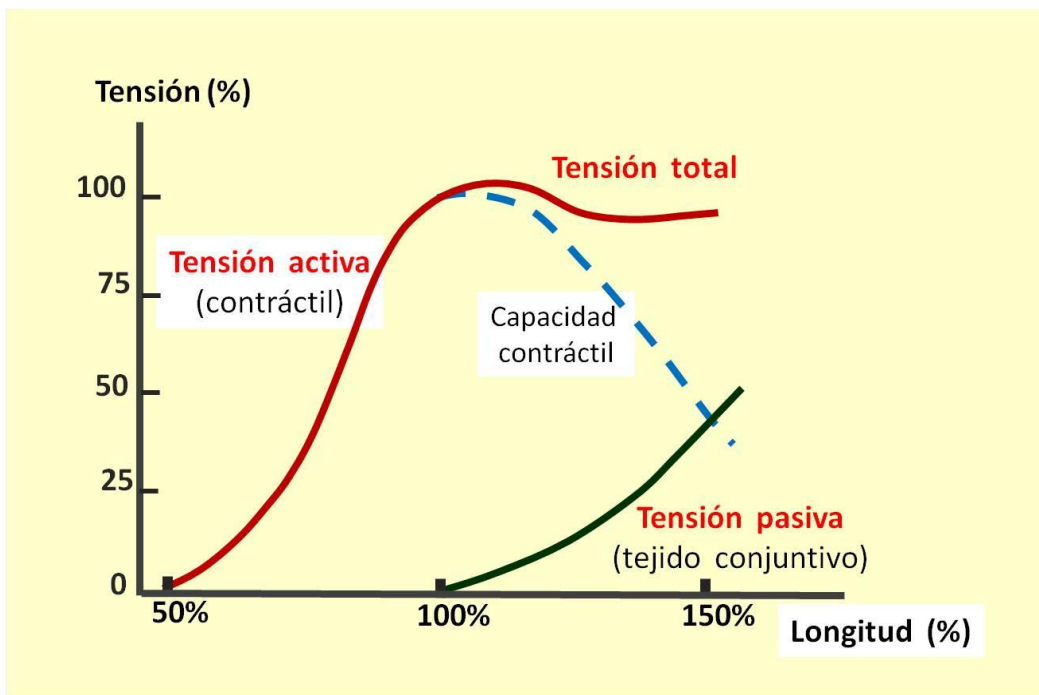


Figura 5. Tensión total del músculo (●); tensión contráctil (●) y tensión pasiva del tejido conjuntivo muscular (●).

Además de la longitud del músculo, la cantidad de fuerza muscular depende también del **área de sección transversa fisiológica**. De forma general, la fuerza máxima que un músculo puede generar es de aproximadamente 50 N/cm² de sección transversal fisiológica. El área de sección transversa fisiológica, se obtiene al cortar el vientre muscular en dirección perpendicular a las fibras que lo constituyen, muestra el número de filamentos de actina y miosina colocados en paralelo. El área total, equivale a la suma de todas las áreas de sección transversa fisiológica que constituyen el músculo. La sección transversa fisiológica es mayor en los músculos peniformes, por poseer mayor número de fibras musculares, por lo que los músculos peniformes generan mayor fuerza que los fusiformes (Fig. 6 A). Los músculos fusiformes (como el bíceps braquial) tienen sus fibras paralelas, y son capaces de contraerse de forma rápida y en estallido. Los músculos peniformes (deltoides e interóseos), por el contrario, poseen fibras atadas al septo, con aspecto de pluma, formando un ángulo con respecto a la línea de acción. Estos últimos son músculos más lentos, pero son

capaces de generar potencia mantenida durante su contracción⁽³⁾. En función de esta característica, los músculos encargados de generar mayor fuerza tendrán sus fibras en disposición peniforme, en cambio, aquellos músculos cuya función de movimiento no exige tanta fuerza tendrán disposición fusiforme (Fig. 6 B).

La proteína de actina sólo puede “trepar” por un trayecto limitado dentro de la sarcómera. Este hecho determina que el sarcómero sólo pueda contraerse hasta el 50% de su longitud inicial. Por lo tanto, La célula o fibra muscular sólo puede reducir su longitud en un 50% aproximadamente. Teniendo en cuenta esta característica, un músculo fusiforme puede acortarse mucho más que un peniforme. De esta forma, los músculos con orientación fusiforme de sus fibras, se localizan en lugares donde se ejecutan movimientos de gran amplitud, mientras que los peniformes, aparecen allí donde se requieren movimientos de pequeña amplitud.

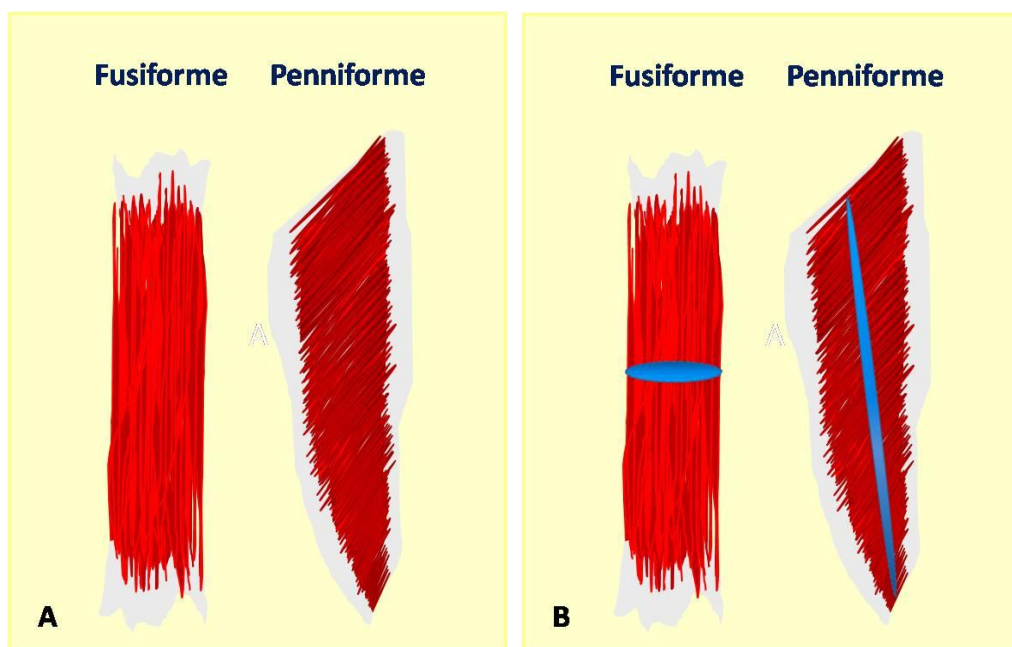


Figura 6. Músculos fusiformes y peniformes; (A) área de sección transversa fisiológica (•) de cada tipo de músculo (B).

Los valores máximos de fuerza se alcanzan a la edad aproximada de 25 años⁽⁸⁾ a partir de esa edad, especialmente en las personas sedentarias, la cantidad de fuerza disminuye progresivamente^(9,10). A partir de la pubertad, la fuerza que pueden alcanzar las mujeres es siempre menor que la desarrollada en los hombres. Considerando que el 43% del peso corporal corresponde a la masa muscular, a mayor envergadura del individuo o peso corporal (siempre que no sea obeso) mayor fuerza puede desarrollar. Por último, el entrenamiento es un factor decisivo en el desarrollo de la fuerza^(11,12,13), ya que es responsable de la hipertrofia muscular, aumento de la resistencia a la fatiga e

incremento de las actividades metabólicas, bioquímicas y enzimáticas de las fibras musculares ^(14,15).

Si un músculo debe contraerse con cierta fuerza, actúa un número determinado de unidades motoras. Si la fuerza debe incrementarse, habrán de reclutarse nuevas unidades motoras. La secuencia de activación de las unidades motoras es siempre la misma, primero se activan las unidades encargadas de soportar las cargas ligeras para ir reclutando unidades cuando se precisa mayor fuerza (Fig. 7).

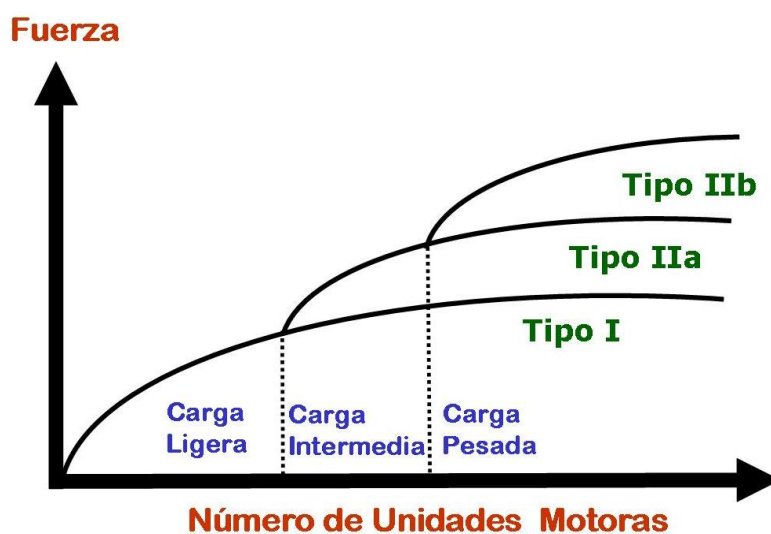


Figura 7. Secuencia de activación de las fibras musculares en función de la carga de la acción a realizar.

Aunque la fuerza muscular pudiera mantenerse constante durante un movimiento articular, el componente rotatorio (movimiento rotatorio) y el momento de fuerza creado variarán según el ángulo de inserción o de aplicación de la fuerza. Por lo tanto, no toda la tensión o fuerza producida por un músculo, es utilizada para originar rotación del segmento articular.

Dependiendo del ángulo de inserción muscular, parte de la fuerza generada se utiliza como estabilizadora, ayudando a mantener la coaptación de los segmentos que constituyen la articulación. La resultante de la fuerza de contracción del músculo origina una componente que contribuye a la estabilidad ⁽⁷⁾. La magnitud de la componente estabilizadora (colabora con la coaptación articular) así como la de la componente rotatoria (genera el movimiento articular) dependerá del ángulo de aplicación de la fuerza muscular (Fig. 8).

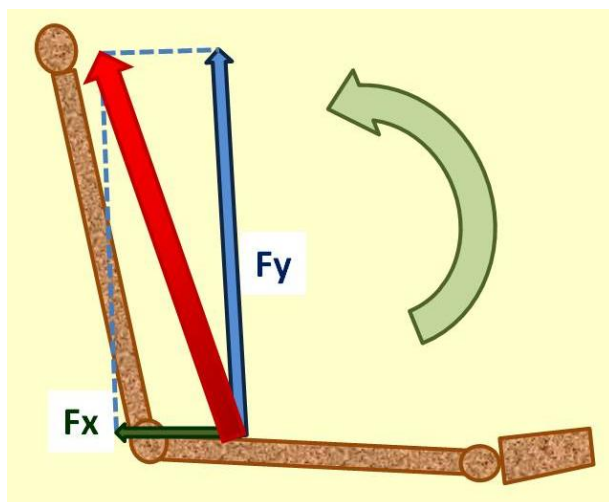


Figura 8. Vector de acción muscular (bíceps) con su componente estabilizador (Fx) y componente de movimiento (Fy).

Para determinar la acción de un músculo debemos, por tanto, considerar su posición en relación a la articulación, es el denominado **momento de fuerza**. El momento de fuerza indica la tendencia hacia el movimiento angular de un músculo. Equivale al producto de la Fuerza (F) por la distancia desde la línea de aplicación de dicha fuerza al eje de giro articular (d) (Fig.9).

$$M \text{ (momento de fuerza)} = F \cdot d$$

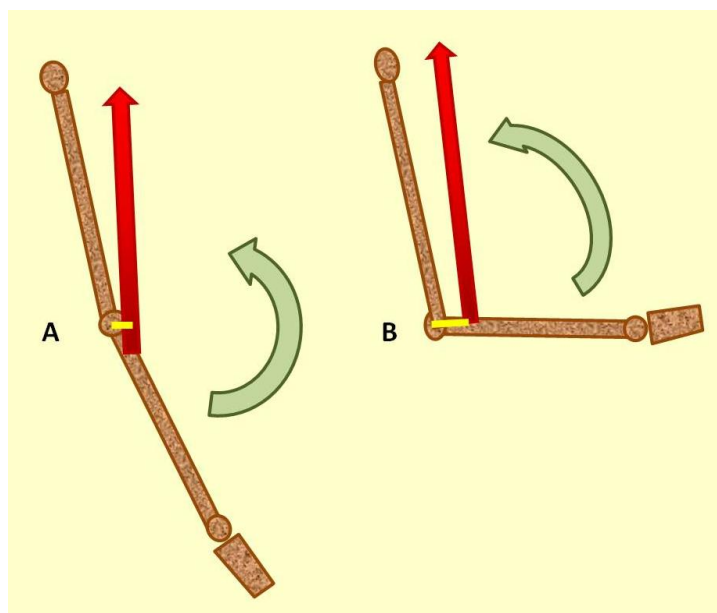


Figura 9. Vector de acción muscular del bíceps: vector fuerza (●) y distancia desde la línea de aplicación hasta el centro de giro articular (●) que es mayor en la posición B del codo que en la posición A.

TRABAJO MUSCULAR

El trabajo mecánico corresponde al producto de la fuerza aplicada sobre un objeto y la distancia en la que el objeto se mueve durante la aplicación de dicha fuerza.

$$W (\text{trabajo}) = F \cdot l$$

Pero al tratarse del trabajo de un músculo que genera un movimiento articular, se define como el producto del Momento de fuerza y el desplazamiento angular del segmento en la dirección del movimiento generado.

$$W \text{ angular} = M \text{ Fuerza} \cdot \text{Recorrido angular (radianes)}$$

Si tenemos en cuenta el tipo de contracción muscular, podemos dividir el trabajo en varios tipos:

1. **Trabajo estático** (isométrico). En este tipo de trabajo, la longitud total del músculo no varía pero, en cambio, existen variaciones de longitud “internas” en la máquina muscular (sarcómeras) ^(15,16). El gasto fisiológico de este tipo de trabajo está muy disminuido, además existe una gran fatiga provocada por la isquemia que se genera durante la contracción.
2. **Trabajo dinámico** (realizado en una contracción isotónica). Dentro de este grupo, podemos diferenciar dos tipos diferentes de trabajo en función del acortamiento (trabajo concéntrico) o elongación (trabajo excéntrico) que realice el músculo:
 - 2.1. **Trabajo dinámico concéntrico**: la fuerza muscular produce rotación del segmento articular en el mismo sentido del cambio del ángulo articular (Fig. 9 A). La acción es denominada trabajo positivo ya que el movimiento de la articulación se lleva a cabo contra la gravedad, o bien se origina un movimiento de aceleración del segmento articular. Además, la energía generada durante la acción, se pierde hasta un 75% debido a las fuerzas de fricción que se crean en el interior del músculo mientras tiene lugar el acortamiento (Fig. 10 A). Esto significa que el gasto fisiológico es elevado ya que sólo el 25% de la energía liberada se utiliza como trabajo mecánico ya que el resto se gasta en vencer la inercia inicial, desprendiéndose en forma de calor.

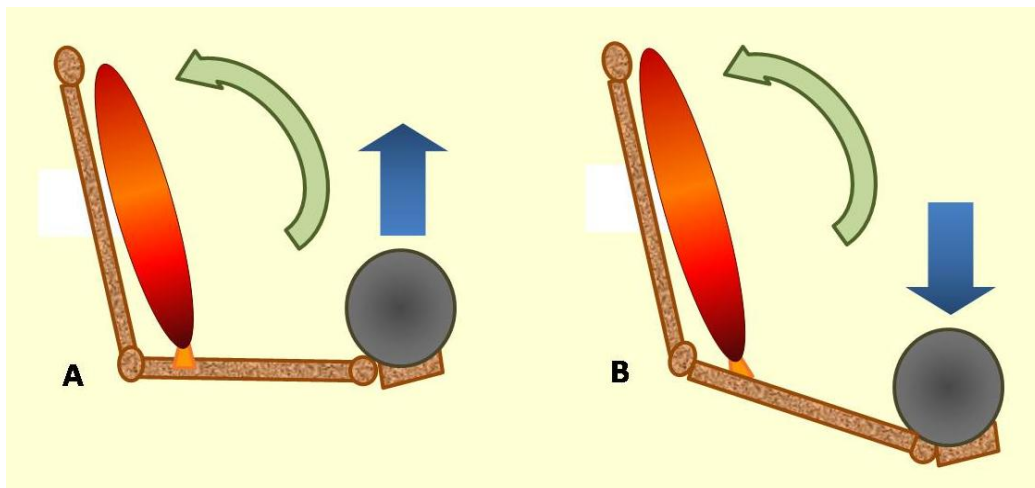


Figura 10. Gráfica que muestra la el trabajo concéntrico (A) y el trabajo dinámico excéntrico (B).

- 2.2. **Trabajo dinámico excéntrico:** la fuerza muscular produce rotación en sentido contrario al del cambio del ángulo articular (Fig. 9 B). La acción es denominada trabajo negativo porque el movimiento de la articulación es a favor de la gravedad, o se realiza una desaceleración o freno del segmento articular. El gasto fisiológico, en este tipo de trabajo, está disminuido. Una pequeña parte de la energía generada se pierde en controlar el movimiento y en regular su velocidad (Fig. 10 B).

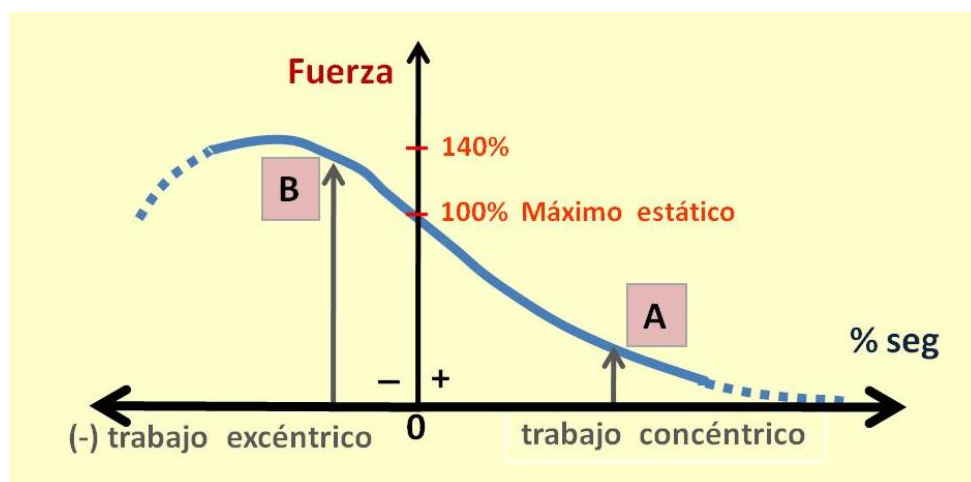


Figura 10. Gráfica que muestra la fuerza generada durante la realización del trabajo, por los diferentes tipos de contracción muscular: concéntrica (A) y excéntrica (B).

En relación al coste energético y la capacidad de generar fuerza, la acción muscular excéntrica puede desarrollar la misma fuerza que los otros dos tipos de acciones (concéntrica e isométrica) con menor número de fibras activadas ^(7,12). Consecuentemente, este tipo de acción es más eficiente y consume menor cantidad de

oxígeno ⁽⁷⁾. Además, la acción excéntrica muscular es capaz de generar mayor cantidad de fuerza o tensión interna muscular que los otros dos tipos de contracción.

Cuando un músculo se contrae al realizar un trabajo excéntrico máximo, es un 40% más potente que si realiza un trabajo estático máximo. Las pruebas realizadas con animales indican que la fuerza excéntrica (o de frenado) puede exceder el máximo isométrico hasta en un 80%. En pruebas de laboratorio con seres humanos, la curva de trabajo depende en gran medida de factores como motivación, el miedo a lastimarse, etc. En una situación de emergencia cabría esperar valores más altos que los obtenidos en el laboratorio, ya que en experimentación animal se obtienen valores de trabajo máximo excéntrico puede exceder el 80% del máximo isométrico.

Para poder entenderlo mejor, utilizaremos el modelo utilizado por Wirhed ⁽⁶⁾, para ello, debemos considerar una oruga (fibra muscular) apoyada sobre una superficie a través de sus patitas (número de patitas en contacto con el suelo igual a número de puentes de actina-miosina). En la acción concéntrica, al acortarse el músculo el número de puentes de actina-miosina disminuye (menor número de patitas apoyadas sobre el suelo) por lo que la fuerza generada es cada vez menor (Fig. 11).

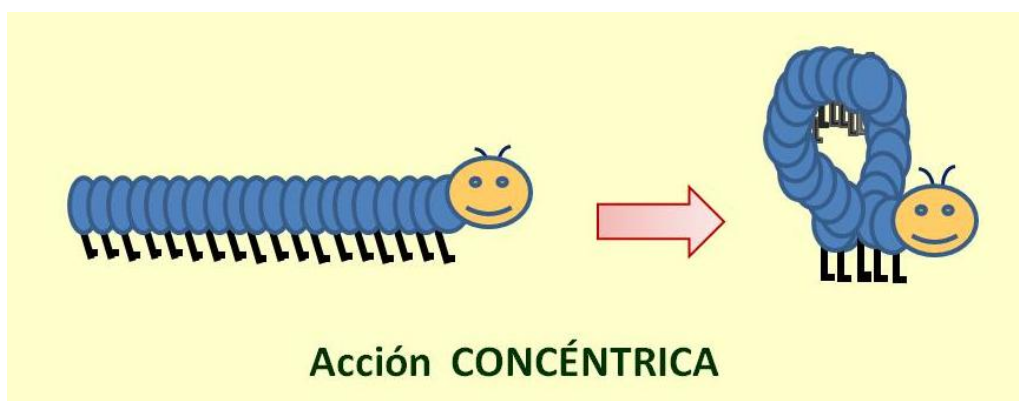


Figura 11. Dibujo que muestra la pérdida de fuerza (disminución del número de patitas en contacto con el suelo) al final de la acción concéntrica muscular.

Por el contrario, durante la acción excéntrica, el músculo está contraído y por lo tanto activados todos los puentes de actina-miosina (máximo número de patitas apoyadas sobre el suelo). Desde esa posición, al sufrir elongación el músculo, a la fuerza generada por las sarcómeras activadas se le suma la tensión generada por el tejido conjuntivo muscular que está siendo estirado. Según progresa la tracción, la fuerza generada es cada vez mayor (Fig. 12).

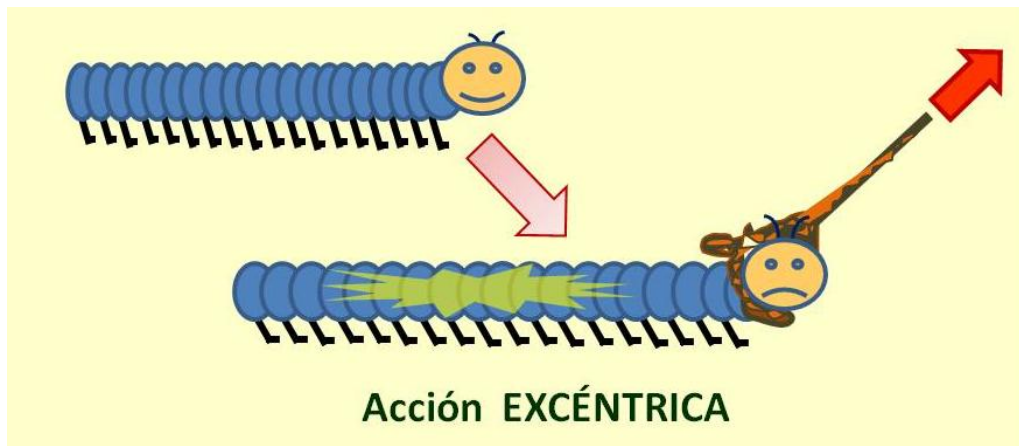


Figura 12. Dibujo que muestra el aumento de fuerza (acción contráctil de las sarcómeras + tensión del tejido conjuntivo muscular) al final de una acción excéntrica muscular.

POTENCIA MUSCULAR

La tensión máxima que puede desarrollar un músculo, y que hemos denominado fuerza, también depende de la velocidad con la que se realiza el movimiento. La **potencia muscular**, corresponde al trabajo angular realizado por un músculo (o grupo muscular) en relación al tiempo en el que ha sido hecho y depende de la edad del sujeto, disminuyendo en la edad senil ^(17,18). Un músculo será tanto más potente cuanto menor sea el tiempo que haya empleado para realizar un trabajo. Por lo tanto, se trata de una relación fuerza-velocidad. La fórmula de la potencia es la siguiente:

$$P = dW/dt$$

En el caso de la potencia muscular, el movimiento generado es de tipo angular, por lo que la fórmula correcta es:

$$P \text{ angular} = M \text{ Fuerza (N.m) . Velocidad angular (rad/seg)}$$

El desarrollo de potencia muscular es mayor en las fibras de acción rápida, que son capaces de generar cuatro veces más pico de potencia que la originada por las fibras musculares lentas ^(1,2,7). Las fibras musculares se contraen a una velocidad específica mientras generan la fuerza necesaria para mover un segmento o elevar un peso externo determinado. En el caso de la acción isométrica, la velocidad es nula. Durante la acción concéntrica, la velocidad y la fuerza están inversamente relacionadas. La máxima fuerza generada se obtiene a velocidades próximas a cero (situación de máxima cantidad de puentes actina-miosina) y la mayor velocidad de la acción concéntrica se alcanza generando mínima fuerza (menor número de puentes) (Fig. 13).

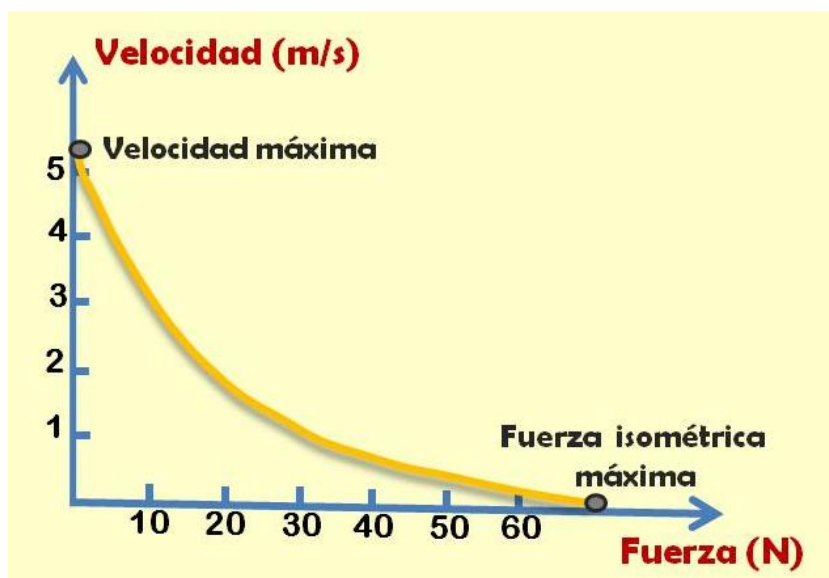


Figura 13. Gráfica que muestra la disminución de la fuerza muscular con la velocidad de la acción concéntrica y, a la inversa, velocidad mínima cuando se genera la fuerza máxima.

Si la carga se acerca al máximo, el tiempo de ejecución será más lento. Las velocidades altas suponen una disminución progresiva de la tensión alcanzable por el músculo (a mayor velocidad de la oruguita, menor número de patitas apoyadas en el suelo) (Fig.14).

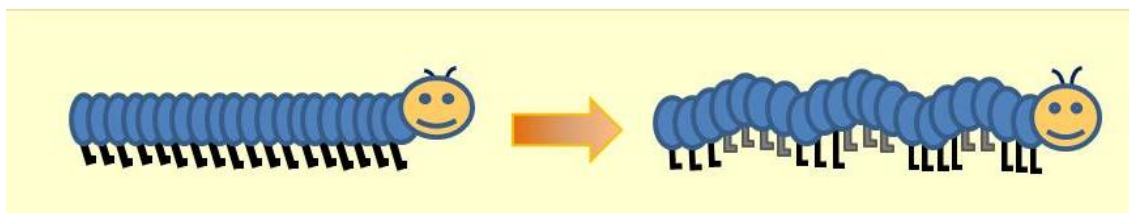


Figura 14. Dibujo que muestra la disminución de la fuerza muscular con la velocidad de la acción concéntrica (a mayor velocidad menor número de patitas en contacto con el suelo).

En la acción excéntrica muscular, situación creada cuando una carga externa es mayor que la fuerza máxima isométrica para esa longitud muscular, se origina una elongación excéntrica del músculo. En los estadios iniciales, la velocidad y los cambios en longitud de la sarcómera son pequeños. Cuando la carga sobrepasa el 50% del máximo isométrico, la velocidad es muy alta. El músculo alcanza el máximo grado de tensión en las acciones excéntricas y a velocidades relativamente elevadas ⁽⁸⁾ (Fig. 15).

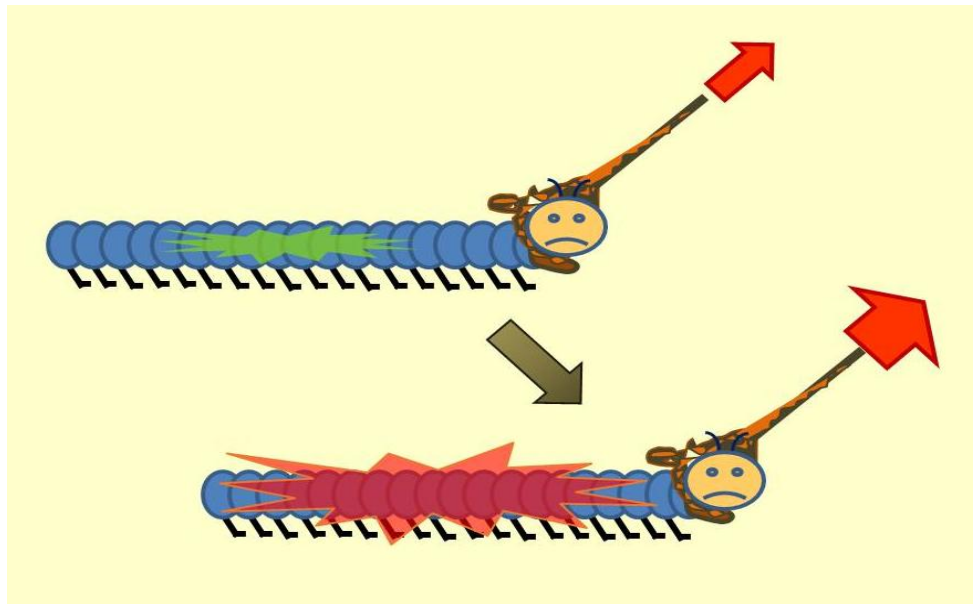


Figura 15. Dibujo que muestra aumento de la fuerza muscular con la velocidad de la acción excéntrica (a mayor velocidad mayor rigidez del tejido muscular y por lo tanto mayor tensión generada en el músculo).

La máxima potencia que puede alcanzar un músculo depende de factores morfológicos (tipo de fibra y proporción de las mismas en el músculo), arquitectura muscular, propiedades del tendón y factores neurológicos como reclutamiento de unidades motoras, frecuencia de acción y sincronización de la activación ⁽¹⁹⁾.

En resumen, la fuerza total resultante de una acción muscular depende, por tanto, de varios factores:

1. De la longitud de reposo del músculo.
2. De la sección transversa fisiológica.
3. Del ángulo de inserción del tendón (momento de fuerza muscular).
4. De la contribución del componente elástico muscular.
5. De la velocidad de la acción muscular.
6. De factores biológicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Trew M, Everett T. Fundamentos del movimiento humano. 5ª ed. Editorial Masson - Elsevier Churchill Livingstone. Barcelona. 2006.
2. Oatis CA. Kinesiology. The mechanics and Patomechanics of Human Movement. Lippincott Williams&Wilkins. Philadelphia.2004.

3. Van Cochran G. A primer of Orthopaedic Biomechanics. Churchill Livingstone. New York 1988.
4. Nordin M, Frankel VH. Biomecánica del músculo. En Biomecánica Básica del Sistema Musculoesquelético. (3ªEd). McGrawHill-Interamericana. Madrid. 2004.
5. Mow VC, Huiskes R. Basic Orthopaedic Biomechanics and Mechano-Biology. 3ª ed. Lippincott Williams & Wilkins Philadelphia. 2005.
6. Wirhed R. : “Habilidad atlética y anatomía del movimiento”. 2ª Ed. Edika Med. Barcelona. 1998.
7. Hamill J., Knutzen K.M.: “Biomechanical Basis of Human Movement”. Williams & Wilkins . Baltimore. 1995.
8. Viladot Voegeli A. : “Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor”. Ed. Springer Verlag Ibérica . Barcelona. 2001.
9. Blazevich AJ. Effects of physical training and detraining, immobilisation, growth and aging on human fascicle geometry. Sports Med 2006; 36:1003-1017.
10. Lang T, Streeper T, Cawthon P, Baldwin K, Taaffe DR, Harris TB. Sarcopenia: aetiology, clinical consequences, intervention, and assessment. Osteoporos Int 2010; 21: 543-559.
11. Folland JP, Williams AG. The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increase strength. Sports Med 2007; 37: 145-168.
12. Daniel W.D. West, Nicholas A. Burd, Aaron W. Staples, Stuart M. Phillips. Human exercise-mediated skeletal muscle hypertrophy is an intrinsic process. Int J Biochem Cell Biol 2010; 42: 1371–1375.
13. Adamson M, Macquaide N, Helgerud J, Hoff J, Kemi OJ. Unilateral arm strength training improves contralateral peak force and rate of force development. Eur J Appl Physiol. 2008;103(5):553-559.
14. Kemi OJ, Rognum O, Amundsen BH, Stordahl S, Richardson RS, Helgerud J, Hoff J. One-arm maximal strength training improves work economy and endurance capacity but not skeletal muscle blood flow. J Sports Sci. 2011; 29(2):161-70.
15. Allen DG. Why stretched muscles hurt – is there a role for half-sarcomere dynamics? J Physiol 573.1 (2006) p 4. DOI:10.1113/jphysiol.2006.109918.
16. Allen DG, Westerblad H. Understanding muscle from its length. J Physiol 2007; 583(1): 3-4.

17. Christie A, Snook EM, Kent-Braun JA. Systematic review and meta-analysis of skeletal muscle fatigue in old age. *Med Sports Exerc* 2010 Sep 24. [Epub ahead of print].
18. Dalton BH, Power GA, Vandervoort AA, Rice CI. Power loss is greater in old men during fast plantar flexion contractions. *J Appl Physiol* 2010 Sep 9. [Epub ahead of print].
19. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Developing maximal neuromuscular power: part 1 - biological basis of maximal power production. *Sports Med.* 2011; 41(1):17-38.

Recibido: 17 noviembre 2010.

Aceptado: 28 diciembre 2010.