

**COMPENDIO DE FISIOLOGÍA Y
MORFOLOGÍA MUSCULAR**

Bases, adaptaciones y Respuestas Biológicas al Entrenamiento de la Fuerza

Vicente Ortiz Cervera

INTRODUCCIÓN

Este capítulo no busca un estudio profundo en la fisiológica deportiva sino que quiere dar a conocer de manera breve y clara las bases fisiológicas más importantes para el entendimiento y soporte del entrenamiento de los distintos tipos de fuerza. Al mismo tiempo este capítulo muestra las adaptaciones y respuestas musculares, bioquímicas, endocrinas y biomecánicas las cuales se traducen en una mejora de todos los tipos de fuerza.

BASES MUSCULARES Y NEURONALES

Elementos de la contracción muscular

La fibra muscular

El músculo está formado por numerosas fibras musculares las cuales, a su vez, están formadas por unidades más pequeñas (ver figura 1).

La fibra muscular contiene por una parte el sarcolema (membrana celular de la fibra) y por otra parte miofibrillas. Cada fibra muscular contiene varios centenares o millares de miofibrillas (ver figura 2). Cada miofibrilla contiene filamentos de actina y miosina (son proteínas polimerizadas). La principal proteína del filamento grueso es la miosina y la principal proteína del filamento delgado es la actina. Los filamentos de actina y miosina se interdigitan formando bandas claras (bandas I) y bandas oscuras (bandas A)

Estructura y función del músculo esquelético

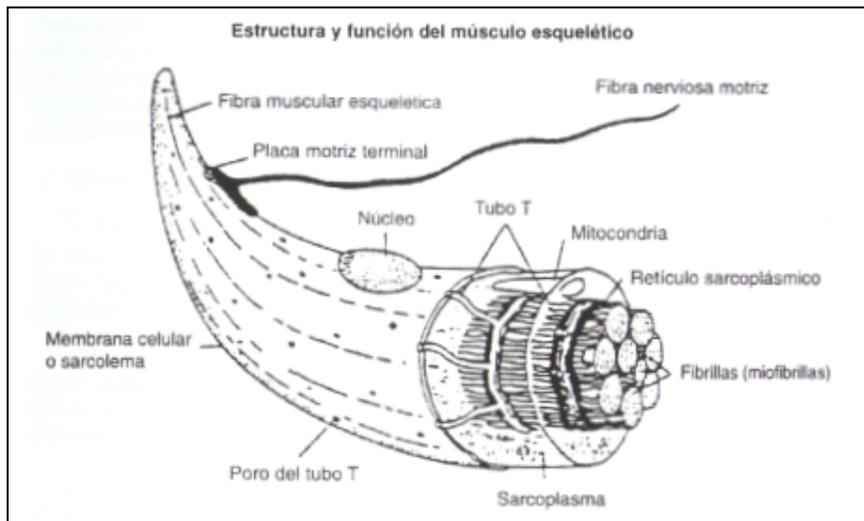


Figura 1. Componentes de la fibra muscular esquelética.

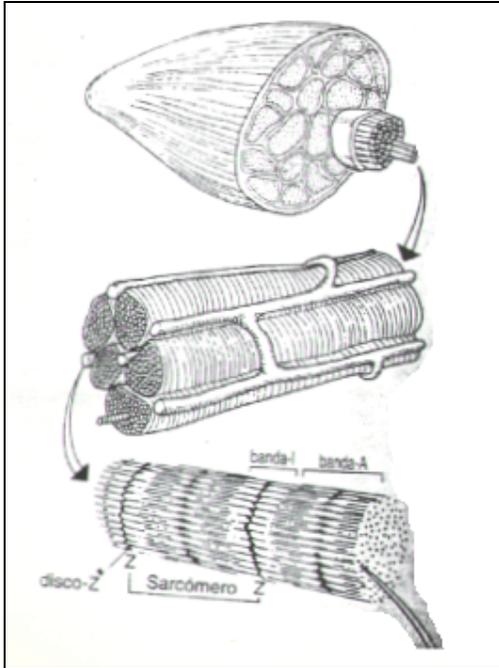


Figura 2. Paquete de microfibrillas y estructura externa de la microfibrilla.

Al lado de los filamentos de miosina aparecen pequeñas proyecciones (puentes cruzados) en los cuales, junto con los filamentos de actina, se produce la contracción muscular. Entre los filamentos de actina se encuentra la línea Z (ver figura 3) la cual se interdigita con los filamentos de miosina y se acorta en la contracción muscular. La porción miofibrilar entre dos líneas Z sucesivas es el llamado sarcómero.

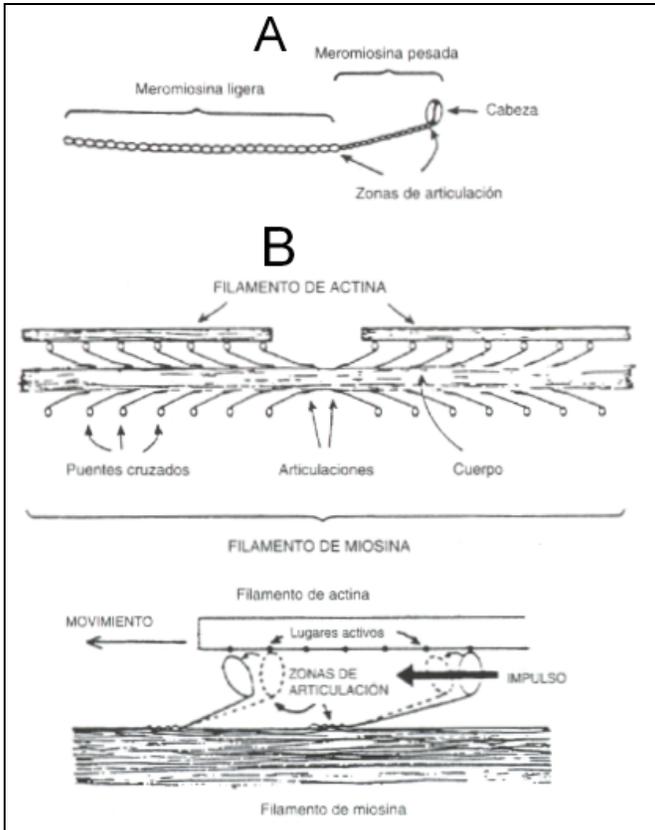


Figura 3. Estructura interna de los filamentos de actina y miosina.

El filamento de actina está compuesto por actina, tropomiosina y troponina. Cada molécula de actina de cada filamento está compuesta de dos moléculas de actina G y unido a cada una de las moléculas de ésta hay una molécula de ADP. La tropomiosina se encuentra en dos filamentos adicionales de la actina. La troponina está unida a la tropomiosina mediante un complejo de tres moléculas de proteína globular (Guyton, A.C. 1984).

Existen distintos tipos de fibras musculares (Komi, P.V. 1992):

- Fibras de contracción lenta (tipo I): son fibras muy resistentes a la fatiga con un bajo contenido de glucógeno y un alto contenido mitocondrial. Poseen un nivel de producción de fuerza bajo y con un suplemento energético de larga duración vía capilares.
- Fibras de contracción rápida (Tipo II A): son fibras con un alto contenido de enzimas glicolíticas y oxidativas. Poseen un nivel de producción de fuerza relativamente elevado y con un suplemento de corta duración vía glucolisis anaeróbica aláctica y láctica.

Fibras de contracción rápida (Tipo II B): son fibras sensibles a la fatiga con un alto contenido en glucógeno y bajo contenido mitocondrial, poseen un nivel de producción de fuerza muy elevado.

Fibras intermedias: son intermedias entre el tipo I y el tipo II, reaccionan ante contracciones rápidas y lentas.

La unidad motora

La unidad motora está formada por una neurona motora que sale de la médula espinal y que suele inervar varias fibras musculares. Existen unidades macromotoras que suelen inervar cinco veces más el número normal de fibras musculares.

La neurona de cada unidad motora suele tener un cuerpo central, un núcleo y un axón por donde se transmite el impulso nervioso hacia las fibras musculares, (ver figura 4). La unión entre la membrana del nervio motor y la membrana de la fibra muscular es la llamada sinapsis, que es por donde se transmite el impulso nervioso a la fibra muscular (ver figura 5). En la sinapsis o también llamada unión neuromuscular se encuentra la acetilcolina la cual es vertida por la terminal del nervio y difluida rápidamente a la membrana muscular. El impulso eléctrico no solamente viaja a lo largo de la membrana de la fibra muscular sino que también alcanza el interior de la fibra muscular por medio del sistema tubular T.

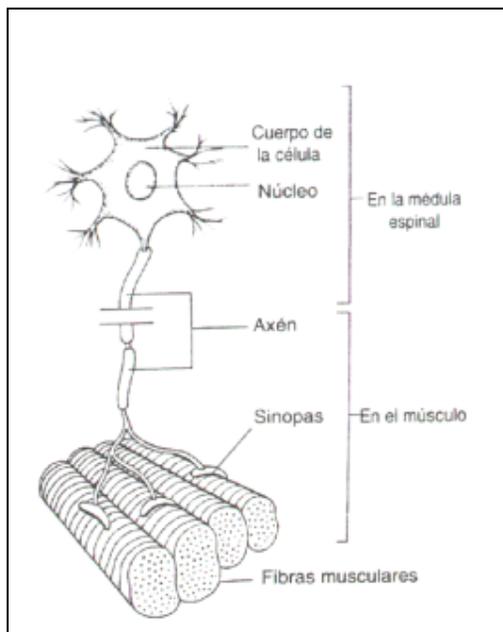


Figura 4. Estructura y conexión de la neurona con la fibra muscular.

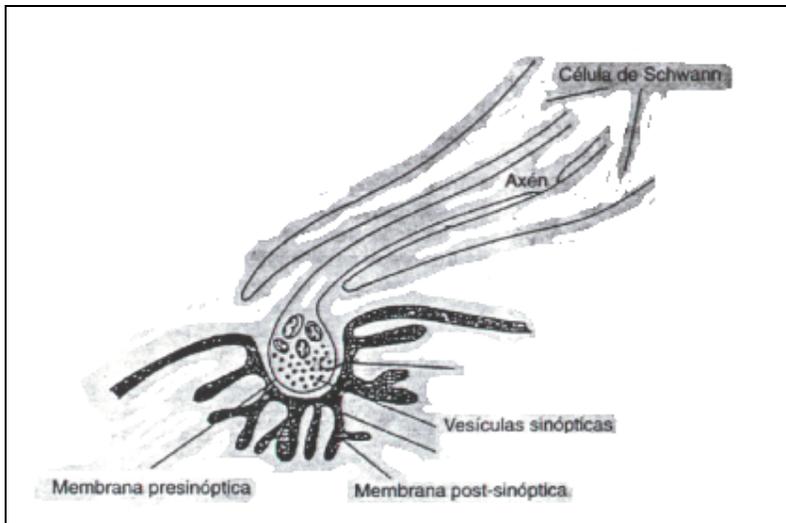


Figura 5. Unión entre la membrana del nervio motor y la membrana de la fibra muscular (sinapsis)

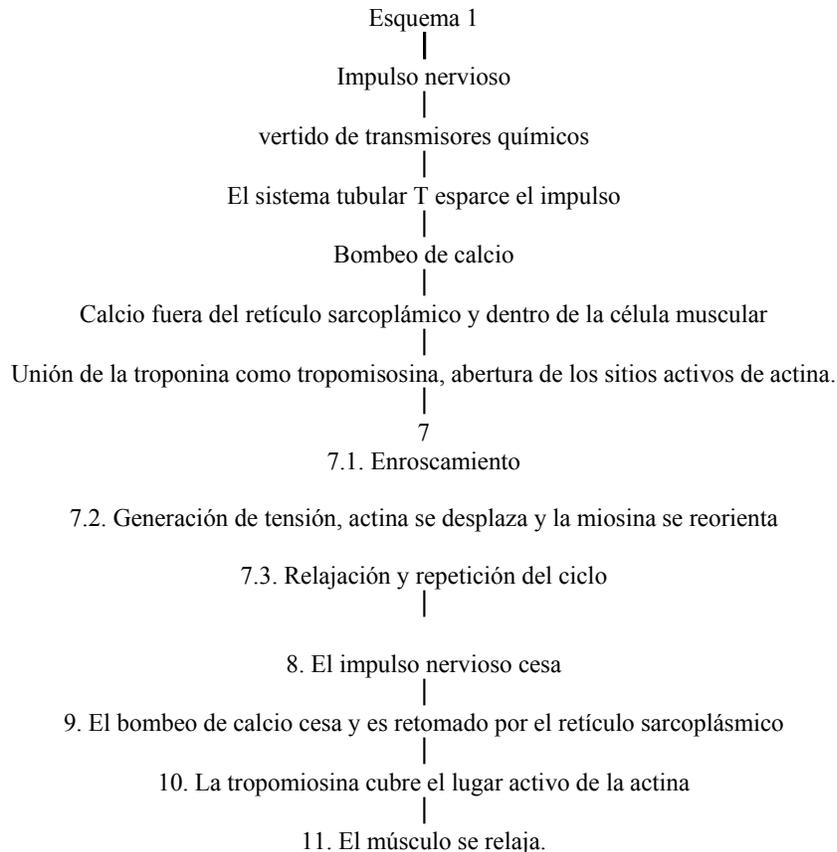
1.2. Mecanismo de la contracción muscular

La contracción muscular es iniciada por el sistema nervioso central, el cual inicia los impulsos nerviosos a través de los nervios motores, los cuales inervan las fibras musculares. El nervio motor y sus fibras musculares forman la unidad motora o motoneurona. El nervio despolariza la membrana externa del músculo y esta información es transmitida al interior de la fibra muscular vía un estructura llamada túbulos transversos (tubulos T). La fibra muscular se contrae completamente o no se contrae (principio del todo o nada).

El impulso del nervio motor alcanza el final de este en la sinapsis (unión neuro-muscular) donde los transmisores químicos (acetilcolina) son segregados. Esto causa la despolarización de la membrana muscular siendo transportado el estímulo a lo largo de las fibras por el sistema tubular T. La despolarización viaja a lo largo del sistema tubular T en ambas direcciones llegando al retículo sarcoplásmico, donde los iones de calcio activan el sistema transportador. Este calcio viaja dentro de la célula muscular en grandes cantidades. El vertido de calcio estimula la contracción muscular, produciendo la unión de la tropomiosina con la troponina formando el complejo troponina-tropomiosina. Esto causa cambios que hacen que los puentes cruzados de los filamentos de miosina reaccionen con los filamentos de actina.

Las cabezas de los filamentos de miosina están desunidas de los de actina en reposo. Cuando el músculo estimula las cabezas de los filamentos de miosina, estos se unen a los de actina provocando una tensión muscular y por tanto fuerza en la contracción. Este fenómeno hace que los filamentos de actina se enrosquen y traccionen sobre los de miosina. Cuando ambos filamentos se unen el ADP y el fosfato se encuentran en la cabeza de la miosina, ésta se orienta hacia la miosina. En este momento la cabeza (S-1) se une al filamento de actina con un ATP. La miosina ATPasa descompone el ATP en ADP y un fosfato más la energía para poder reorientar a la cabeza de miosina hacia un nuevo ángulo y reaccionar en un nuevo lugar activo con la molécula actina. Este proceso se repite y los filamentos de actina se volverán a enroskar produciéndose el mismo proceso. Finalmente el impulso cesará, el calcio dejará de ser activado y será retomado por el retículo sarcoplásmico, el complejo troponina-tropomiosina cubrirá el lugar activo de la actina y el músculo volverá su estado de reposo (ver esquema 1).

El ATP generado por los sistemas energéticos (aeróbico y anaeróbico) es finalmente utilizado por el músculo para producir la contracción muscular. El ATP es una fuente energética presente en la fibra muscular. Este se rompe para formar ADP durante el proceso de contracción y se une posteriormente a una molécula de creatina en la célula muscular creando un nuevo ATP. Por tanto la energía utilizada para la contracción muscular es el ATP almacenado y el fosfato de creatina. Éstos pueden provocar una contracción máxima no más de unos pocos segundos. La fuente de energía encargada de reconstituir la fosfocreatina y el ATP es la energía proporcionada por los alimentos.



El reclutamiento de las unidades motoras

El reclutamiento de una unidad motora se basa en un breve periodo de contracción (milisegundos) seguido de otro de relajación, es el llamado crispamiento.

El Sistema Nervioso Central envía impulsos nerviosos al músculo por medio de la motoneurona para que produzca una contracción muscular. Conforme llegan los impulsos nerviosos se van uniendo las fuerzas de una crispamiento a otro (sumación de crispamiento). Si la acción de cada crispamiento no está completamente unida a la del siguiente se genera una fuerza menor a la máxima que esa unidad motora puede generar. En cambio si la acción de cada crispamiento se une completamente se genera la máxima fuerza posible en esa unidad motora produciéndose una contracción mayor en un periodo más largo de tiempo (Astrand, P.D. & Rodahi, K., 1986).

Además de lo mencionado, el reclutamiento de las unidades motoras se basa en los siguientes principios:

Principio del tamaño: el reclutamiento de las fibras musculares depende del grosor del tamaño de sus axones en orden creciente (de menor a mayor). Las primeras fibras en ser reclutadas son las fibras de contracción lenta (poseen axones más pequeños) y finalmente las de contracción rápida (poseen axones más grandes).

Existe una excepción que se produce durante los movimientos explosivos estereotipados donde las unidades motoras con un elevado umbral de excitación pueden ser activadas sin un reclutamiento anterior de las unidades motoras con bajo umbral de excitación. En las contracciones excéntricas algunas unidades motoras con un bajo umbral de excitación. En las contracciones excéntricas algunas unidades motoras con un nivel de excitación muy elevado pueden ser reclutadas con cargas superiores al 100 % del máximo peso levantado generando así una mayor tensión muscular (Allerheiligen, B., Edgerton, R., Hayman, B., Kuc, J. Lambert, M., MacDougall, J.D., O'bryant, H., Pedemonte, J., Sale, D., Tesch, P., Vermeil, A., Wayne L., 1993).

Principio del todo o nada: a partir de un determinado potencial de acción las motoneuronas de las unidades motrices son reclutadas. Todas las fibras musculares de cada unidad motora se contraen sincrónicamente. La respuesta del músculo se gradúa dependiendo del tamaño de éste y del número de unidades motoras

estimuladas. Los grupos musculares grandes poseen unidades motoras con un umbral de excitación de sus unidades motoras más elevado que grupos musculares pequeños.

Esto indica que en el entrenamiento no es necesario llegar a cargas superiores al 85% de una repetición máxima (1 RM) en grupos musculares pequeños ya sus unidades motoras poseen un umbral de excitación más bajo. Un claro ejemplo es el entrenamiento del músculo bíceps, el cual recluta todas sus unidades motoras de igual manera al 80, 90 y 100% de 1RM. Por tanto su límite de entrenamiento para conseguir una máxima tensión muscular será el 80%, pues a cargas más elevadas conseguiríamos los mismos resultados, pero de esta forma evitaremos posibles lesiones (Allerheiligen, B., Edgerton, R., Hayman, B., Kuc, J., Lambert, M., MacDougall, J.D., O'bryant, H., Pedemonte, J., Sale, D., Tesch, P., Vermeil, A., Wayne L, 1993)

ADAPTACIONES Y RESPUESTAS MUSCULARES, BIOQUÍMICAS Y NEURONALES

2.1. Adaptaciones y respuestas neuronales

Mediante el entrenamiento se consiguen una serie de adaptaciones y respuestas al esfuerzo requerido a nivel muscular que se traducen en una mejora de la fuerza. Estas adaptaciones son las siguientes:

Hipertrofia muscular

Mediante un entrenamiento específico para el desarrollo de la hipertrofia muscular, el número de fibras musculares no aumenta pero sí el área cross-seccional de las fibras existentes (hipertrofia muscular). La hipertrofia muscular se produce en mayor grado en hombres que en mujeres debido a la influencia de hormona testosterona y otras hormonas.

El aumento de la hipertrofia muscular es debido a dos causas:

1. Un aumento en la síntesis de proteínas en el músculo.
2. Un decrecimiento en el catabolismo (destrucción) de las proteínas.

Todos los tipos de fibras son capaces de hipertrofiarse aunque cada tipo utiliza diferentes caminos. Las fibras de contracción rápida aumentan su grosor por un aumento en la síntesis de proteínas, en cambio las fibras de contracción lenta aumentan su hipertrofia por un decrecimiento en el catabolismo de las proteínas (Fleck, S.J. & Kraemer, W.J., 1988).

Mediante el entrenamiento de fuerza máxima y de potencia (fuerza explosiva) se produce un aumento de la hipertrofia de las fibras de contracción rápida en grado mucho mayor que las de contracción lenta (Narici, M.V., Roi, G.S., Landoni, L., Minetti, A.E. & Cerretelli, P., 1990). Mediante un entrenamiento enfocado al aumento de la masa muscular (ej: entrenamiento para culturistas), la hipertrofia muscular es mucho mayor en las fibras de contracción intermedia y de contracción lenta, en cambio mediante un entrenamiento enfocado a la fuerza máxima (Ej: halterofilia, powerlifting o partes específicas de entrenamiento para deportes con alto requerimiento de fuerza explosiva), la hipertrofia muscular se produce en menor grado en general pero el aumento del grosor radica principalmente en las fibras de contracción rápida (Tesch, P.A., Throsson, A & Kaiser, P., 1984; Stone, M.H., Fleck, S.J., Triplett, N.R. & Kraemer, W.J., 1991).

Optimización en la longitud y número de sarcómeros

La optimización de la longitud del sarcómero es muy importante, ya que de ella depende aparentemente la velocidad de contracción y la fuerza generada por el músculo, o más concretamente por el número de puentes cruzados generados entre los puentes de actina y miosina (Komi, P.V., 1992).

Dentro de la optimización del sarcómero también debemos considerar el número de sarcómeros generados en serie, ya que ellos determinan tanto la distancia que el músculo puede acortarse como la longitud del sarcómero sobre la cual éste puede producir su máxima potencia. La regulación del número de sarcómeros es un proceso de adaptación que, junto con el anterior, se traduce en una mejora de la fuerza y potencia del músculo.

Dicha regulación y optimización se produce también en cada ángulo y rango de movimiento, de tal forma que la longitud de los sarcomeros se ajusta al movimiento, añadiéndose o eliminándose sarcomeros y dando lugar a un incremento en la longitud de éste.

2.2. Adaptaciones y respuestas bioquímicas

Dependiendo del tipo de entrenamiento de fuerza, se producen una serie de adaptaciones bioquímicas como las siguientes (Fleck, S.J. & Kraemer, W.J., 1988):

Incremento de:

- Creatinfosfoquinasa
- Miokinasa
- Fosfofructoquinasa
- Lactato deshidrogenasa (no existen cambios)
- ATP almacenado
- PC almacenado
- Glucógeno almacenado
- Triglicéridos almacenados (aumento)

Un entrenamiento prolongado podría aumentar la capacidad de deposición intramuscular de lípidos.

Porcentaje de peso graso (ligero decrecimiento)

Densidad en el volumen de las mitocondrias y de los capilares

Los culturistas poseen más capilares por fibra y una densidad de éstos similar a la de los individuos sedentarios. El entrenamiento de pesas reduce la densidad mitocondrial en los músculos entrenados. Estos cambios son paralelos a los cambios de hipertrofia producidos en el músculo. Por lo tanto, el decrecimiento en la densidad en el volumen mitocondrial podría ser atribuido a un aumento en la cantidad total de proteínas del tejido contráctil. Un aumento en la cantidad de proteína contráctil indica un decrecimiento en la densidad de los capilares, la cual es paralela a un aumento de la hipertrofia muscular.

2.3. Adaptaciones y respuestas neuronales

Los cambios adaptativos que se producen en el sistema nervioso del deportista como consecuencia del entrenamiento son las llamadas adaptaciones (a largo plazo) y respuestas neuronales (a corto plazo). Las adaptaciones neuronales están determinadas por la habilidad del sistema nervioso para realizar una apropiada activación muscular.

Las adaptaciones neuronales producidas son las siguientes:

Aumento en el número y frecuencia de los impulsos nerviosos por segundo transmitidos hacia las Unidades Motoras.

El sistema nervioso puede variar la fuerza de contracción muscular, variando el número de unidades motoras reclutadas y la frecuencia de impulsos nerviosos por segundo.

Para conseguir generar una máxima tensión muscular (completa activación motora) es necesario que se produzcan dos factores:

Que todas las unidades motoras hayan sido reclutadas.

Que todos los impulsos nerviosos tengan una óptima frecuencia para realizar un reclutamiento efectivo de las fibras musculares y por tanto que se genere fuerza. Estos dos factores no influyen en el desarrollo de la hipertrofia muscular.

a frecuencia de impulsos hacia las unidades motoras (UM) aumenta junto con un incremento en el número de estas, activando unidades motoras con umbrales de excitación más alto y que antes eran difíciles de activar. Mediante un aumento de la frecuencia de impulsos, la máxima fuerza generable por un músculo se alcanza más rápidamente y durante mayor periodo de tiempo. Cuando se utilizan cargas submáximas, más y más

fibras son reclutadas después de cada repetición y conforme las unidades motoras se fatigan, otras motoras son reclutadas para evitar la pérdida de fuerza.

Cuando todas las unidades motoras se han reclutado, la única forma de generar una mayor fuerza es mediante el aumento de la frecuencia de impulsos nerviosos (van de 5 a 90 impulsos por segundo). Esto depende de cada músculo pues existen diferentes músculos con unidades motoras con mayor o menor umbral de excitación, puesto que a diferentes cargas se reclutan más o menos UM en cada músculo. En músculos grandes se produce un incremento inicial en el rango de número de impulsos conforme la producción de fuerza incrementa, debido a que poseen un umbral de excitación menor.

Otra adaptación relacionada con este aparato es el reclutamiento selectivo de ciertas subpoblaciones de unidades motoras de los músculos agonistas.

Según Lambert, M.; Sale, D.G.; Allerheiligen, B.; Westcott, B.; Pedemonte, J.; Edgerton, R.; Kuc, J. Y otros especialistas en este campo (1993), el entrenamiento con cargas pesadas y pocas repeticiones desarrolla una mayor capacidad de generación de frecuencia y número de impulsos nerviosos, lo cual se traduce en una mayor fuerza muscular y una mejora de los resultados atléticos.

Vermeil, A. y Hayman, B. (1993) afirman que sólo el entrenamiento mental y el entrenamiento con cargas pesadas y pocas repeticiones, o la combinación de ambos son la clave para la mejora de este factor y de la fuerza total del individuo.

Como conclusión podemos afirmar que sólo el levantamiento de cargas pesadas con pocas repeticiones es el principal causante de la mejora de este factor.

Mejora en el grado de sincronización de la actividad de las unidades motoras (sincronización intramuscular).

La mejora de la sincronización se produce después de un periodo de entrenamiento de fuerza no siendo las cargas elevadas el factor predominante.

Este factor está íntimamente asociado a la frecuencia de estimulación de las UM. Si se requiere un máximo esfuerzo, las UM se sincronizan con su máximo número posible y con un mayor número de impulsos nerviosos por segundo. Éste sólo le ocurre a la UM pero no al músculo, el cual es asincrónico en su reclutamiento, ya que si no fuera así se contraería un momento y súbitamente, sin existir movimiento refinado de ningún tipo.

Es prácticamente una ley, que una descoordinada frecuencia de impulsos nerviosos incide en una disminución en los resultados atléticos. Para mejorar el grado de sincronización de las UM debemos considerar 3 puntos importantes en el entrenamiento con nuestros deportistas:

Los deportistas deben pensar en la explosividad del movimiento (esto mental)

El entrenamiento pliométrico es el más adecuado para mejorar la sincronización aunque el menos aconsejable para los puberales.

Según E.B. Kossowakaja, V.W. Kunezow., Allerheiligen, B., Edgerton, R., Hayman, B., Kuc, J., Lambert, M., MacDougall, J.D., O'bryant, H., Pedemonte, J., Sale, D., Tesch, P., Vermeil, A., Wayne L. (1993) y otros investigadores, el entrenamiento de pesas con pocas repeticiones y elevadas cargas supone una mejora adicional en la capacidad de frecuencia de impulsos nerviosos y en la sincronización de éstos (Kernell, D., 1986).

En consecuencia, para mejorar la sincronización nerviosa debemos actuar con ejercicios de alta intensidad y con ejercicios explosivos.

Mejora en la coordinación intermuscular.

La mejora de coordinación entre músculos produce una serie de adaptaciones:

- Inhibición de los antagonistas a la hora de realizar un ejercicio (sobre todo si es difícil de coordinar).
- Aumento de la co-contracción de los sinergistas que ayudan a estabilizar la articulación y complementar el trabajo de los agonistas.
- Inhibición del mecanismo de protección neuromuscular.
- Aumento de la excitabilidad de la motoneurona.
- Un reclutamiento selectivo de unidades motoras influenciadas por el tipo de acción muscular asociada a tipo y velocidad de movimiento y ángulo en que se realiza. Este reclutamiento selectivo podría estar afectado por cambios en el ángulo del movimiento.

Todos estos factores sólo pueden ser mejorados en grado elevado por ejercicios unilaterales Y/o sobrecargados que implican una coordinación de muchos grupos musculares y articulaciones. Un claro ejemplo son las cargadas colgantes, tirones, push-press, gimnásticos, etc.

Mejora en la inhibición neuromuscular.

Según Lambert, M. (1993) la inhibición neuromuscular es una reacción protectora del cuerpo humano en la que ceden y se relajan los músculos cuando se ejerce una fuerza sobre ellos muy superior a que pueden soportar teóricamente. Los órganos propioceptores (órgano tendinoso de Golgi y los husos musculares) localizados en nuestros tendones y articulaciones inhiben la fuerza de la contracción muscular si reciben la información de que la fuerza que se ejerce sobre ellos puede colapsar la articulación. Cuando más se entrenan los esfuerzos máximos en un individuo, mayor es la potenciación de los propioceptores.

Según Vermeil, A. y Hayman, B. (1993), la inhibición neuromuscular juega un papel importante en la posible reducción de fuerza en el individuo. Para evitar esto es necesaria una capacidad de generar un alto grado de fuerza, una buena coordinación neuromuscular y una mecanización de técnica de los ejercicios.

Según O'Bryant, H. (1993), el entrenamiento explosivo es más adecuado que el utilizar movimientos lentos con una alta tensión muscular en el entrenamiento.

Para poder reducir el mecanismo de inhibición neuromuscular nos debemos basar en dos factores:

- Ejercicios con elevada explosividad de movimiento.
- Una estimulación sensorial especial e hipnosis (no recomendada en adolescentes y puberales, debido a la falta de adaptación fisiológica al esfuerzo con cargas muy elevadas).
- Aplicación del método de estiramiento PNF (facilitación neuromuscular propioceptiva).

2.4. Temporalización de las adaptaciones para el desarrollo de la fuerza y la potencia.

Las adaptaciones neuronales son el principal factor de mejora de la fuerza y son más importantes que las adaptaciones producidas por la hipertrofia muscular las cuales no influyen sobre los factores neuronales.

Las adaptaciones neuronales suponen un incremento de numerosos mecanismos anteriormente mencionados como: la inhibición de los antagonistas, aumento de la co-contracción de los sinergistas, incremento de la activación de los agonistas, mejora de la inhibición del mecanismo de protección neuronal, incremento de la excitabilidad de las motoneuronas, etc.

La progresión de las adaptaciones de fuerza es de crucial importancia a la hora de establecer la programación, control y planificación del entrenamiento. Estas adaptaciones se producen en este orden (Fleck, S.J. & Kraemer, W.J., 1987):

1-2 semana: adaptaciones coordinativas (son también neuronales y no hay incremento en el tamaño del músculo).

3-6 semana: adaptaciones neuronales.

7-12 semana: adaptaciones por hipertrofia.

Ambas adaptaciones se van produciendo durante ciclos de 12 semanas, aunque, dependiendo de la temporalización, unas con mayor medida que otras.

Hakkinen, K., Komi, P.V., Alen, M. y Kauhainen, H. (1987) nos indican que las planificaciones que buscan conseguir una mejora de la fuerza máxima (como base de todos los otros tipos de fuerza) se deben realizar en ciclos de 12 semanas. Según Hakkinen en ciclos de 7-8 semanas en mujeres, pues las adaptaciones por hipertrofia en mujeres son mucho menores debidas a su bajo vertido hormonal (Fleck, S.J. & Kraemer, W.J., 1988), sin embargo las neuronas adquieren un papel mucho más preponderante.

En consecuencia, los posibles mejores resultados en el aumento de la fuerza muscular se pueden conseguir con la combinación de los factores neuromusculares y de hipertrofia, siendo los primeros en mayor medida predominantes. Estas adaptaciones se mantienen a niveles elevados de 1 a 2 semanas después de cada ciclo de 12 semanas, a partir de los cuales si no se aplican nuevos estímulos de fuerza las mejoras conseguidas empiezan a disminuir.

BASES ENDOCRINAS

El sistema nervioso, junto con el sistema endocrino o hormonal, regulan las funciones del organismo. El sistema endocrino está relacionado con la función metabólica de las células, controla la intensidad de sus funciones químicas, el transporte de sustancias a través de las membranas celulares, etc. La segregación hormonal es debida a la respuesta a estímulos nerviosos, principalmente gracias a la médula suprarrenal y la hipófisis anterior y posterior.

La hormona es una sustancia química segregada en los líquidos corporales por una célula o grupo de células las cuales ejercen en efecto fisiológico sobre el control de otras células. La función hormonal fundamental relacionada con el desarrollo de la fuerza es el aumento del grosor de la célula muscular. Esta acción anabólica está influida por determinadas hormonas que desarrollan el anabolismo muscular. Estas son la hormona del crecimiento, insulina, testosterona y las hormonas secretadas por la glándula tiroides.

La hormona del crecimiento

La hormona del crecimiento (GH) es una hormona polipéptida secretada desde la glándula pituitaria anterior, la cual está íntimamente relacionada con el proceso de crecimiento de las células musculares y óseas y de otros tejidos del cuerpo humano. La GH está regulada por un complejo sistema de mecanismo de feedback neuroendocrino. La GH estimula directa e indirectamente las siguientes acciones metabólicas (Chang, F., Dodds, W., Sullivan, M., Kim, M. & Malarkey, W., 1985, Florini, J.R., 1987):

- Reducción de la utilización de la glucosa.
- Decrecimiento de la síntesis de glucógeno.
- Aumento del transporte de los aminoácidos a lo largo de la membrana celular.
- Incremento de la síntesis proteica.
- Incremento en la utilización de los ácidos grasos.
- Incremento de la lipólisis.
- Aumento de la síntesis de colágeno.
- Estimulación del cartilago del crecimiento.
- Retención de nitrógeno, sodio, potasio y fósforo.
- Aumento del fluido de plasma renal y filtración glomerular.
- Promoción de la hipertrofia renal compensatoria.

La hormona del crecimiento es secretada intermitentemente y tiene variaciones diurnas, estando sus niveles más elevados durante las fases de sueño. Se ha relacionado a la GH con varios mecanismos de reparación celular. Por lo tanto es posible que la segregación de la GH esté directamente relacionada con las adaptaciones de las unidades contráctiles del músculo y por lo tanto con la expresión de fuerza y potencia.

Factores externos tales como el sueño, nutrición, consumo de alcohol y el ejercicio alteran los patrones de segregación de esta hormona.

La insulina

La insulina como factor de crecimiento

La insulina como factor de crecimiento celular (IGF) actúa sobre pequeños polipeptidos que mediatizan los efectos de la GH. Todas las acciones biológicas atribuidas a la GH son mediatizadas por la IGF.

Para la síntesis de proteínas se necesita insulina. Las dos hormonas (GH y IGH), al parecer, funcionan de forma sinérgica para promover el crecimiento celular, realizando una función específica, promueven la captación celular de una selección diferente de aminoácidos necesarios para el desarrollo de crecimiento. Así se consigue el transporte activo de aminoácidos al interior de las células.

La insulina

La insulina afecta al metabolismo de los carbohidratos promoviendo la captación, depósito y uso de glucógeno por el hígado. Ésta promueve el metabolismo de la glucosa en el músculo y afecta al metabolismo de las grasas.

Juega un papel importante en el almacenamiento y la síntesis de proteínas y por tanto en el desarrollo de las unidades contráctiles vía el metabolismo de las proteínas. Junto con la IGH, inhibe la degradación y los efectos catabólicos de otras hormonas, como pueden ser los glucocorticoides sobre el aparato muscular (Komi, P.V.1992).

La testosterona

La testosterona es un andrógeno, es decir, una hormona esteroidea que produce los rasgos distintivos del género humano. Es un anabolizante que juega un papel determinante en el mantenimiento y desarrollo del músculo y del hueso. Es producida en las células intersticiales de Leydig (situadas en los testículos) y en la corteza suprarrenal actúa positivamente en la estimulación, crecimiento y desarrollo de las células musculares, aunque no en su número. El incremento de la masa muscular o hipertrofia muscular, es debido a la síntesis de glucógeno muscular y aumento de los depósitos de fosfocreatina y proteínas contráctiles del músculo. El depósito de proteínas cesa al cabo de varios meses aunque haya un aporte externo de testosterona. Este proceso no se produce si se estimula al músculo mediante un entrenamiento de fuerza con sobrecargas a partir del comienzo de la adolescencia. Al mismo tiempo la testosterona produce un incremento en el espesor del hueso y depósito de sales cálcicas conllevado un aumento en la cantidad de matriz ósea y en la retención cálcica dando como resultado la consecución o el logro de huesos más grandes y fuertes (Ortiz, C.V. 1994).

Los estrógenos y la progesterona

Son los dos tipos de hormonas sexuales femeninas: los estrógenos y la progesterona. Los estrógenos provocan principalmente la proliferación de células específicas en el cuerpo que darán lugar a la mayor parte de los caracteres femeninos.

Los estrógenos tienen efectos positivos sobre el esqueleto, ya que aumentan la actividad osteoblástica, provocan la soldadura de la epífisis con el diáfisis de los huesos largos, estimulan el depósito de cantidades elevadas de matriz ósea y un ligero aumento de la proteína corporal total. Esta última función es mucho menos intensa que la realizada por la testosterona.

La progesterona ejerce un efecto catabólico sobre las proteínas humanas, similar a la de los glucocorticoides

La hormona tiroidea.

La hormona tiroidea tiene efectos generales y específicos en el crecimiento. Ésta se manifiesta principalmente en el desarrollo de los niños. El efecto estimulante en el crecimiento por parte de la hormona tiroidea depende posiblemente de su capacidad para promover la síntesis de proteínas. Por otra parte, un exceso de esta puede causar un catabolismo (destrucción) más rápido de la síntesis de proteínas movilizándose los depósitos de proteínas y liberándose los aminoácidos a los líquidos extracelulares.

Glucocorticoides (Cortisol)

El cortisol es una hormona catabólica que afecta al músculo esquelético, concretamente convierte los aminoácidos en carbohidratos, incrementa las enzimas proteolíticas, inhibe la síntesis proteica, incrementa la degradación de las proteínas y realiza una gran acción catabólica sobre las fibras de contracción rápida. En situaciones de inactividad, enfermedad, inmovilización o lesión, su actividad catabólica aumenta a nivel molecular sobre las fibras musculares.

Catecolaminas (adrenalina, noradrenalina, dopamina)

Su función sobre el aumento del crecimiento muscular es todavía incierta pero por otra parte juegan un papel importante en el desarrollo prenatal acelerando el proceso de crecimiento.

4. ADAPTACIONES Y RESPUESTAS ENDOCRINAS

Las respuestas y adaptaciones del sistema endocrino y hormonal al entrenamiento de fuerza han sido relacionadas con una mejora en la producción de fuerza, siendo también activados los mecanismos de reparación de los tejidos como parte del proceso de remodelado y recuperación después de las sesiones de entrenamiento (Alway, S.E., McDougall, J.D., Sale, D.G., Sutton, J.R. & McComas, A.J., 1988).

Las diferentes respuestas y adaptaciones del sistema endocrino dependen en gran medida de la carga utilizada, del volumen de entrenamiento, del tiempo de recuperación entre series y ejercicios y del tiempo de recuperación entre sesiones. La variedad y la planificación del entrenamiento son uno de los factores más efectivos para conseguir grandes mejoras en la fuerza y potencia.

Mediante el ejercicio, las concentraciones de hormonas en sangre aumentan para ser transportadas y posteriormente interaccionarse con sus receptores, produciendo efectos en la célula que se traducirán en unas adaptaciones celulares que conllevarán un aumento en la producción de fuerza. Errores en la programación de las sesiones de entrenamiento se traducen en un aumento de los efectos catabólicos y en una ineffectividad del programa.

A continuación vamos a desarrollar las adaptaciones producidas por las hormonas más importantes en las adaptaciones endocrinas y en la producción de fuerza.

La hormona del crecimiento

El aumento en la producción de la hormona del crecimiento (GH) está íntimamente relacionado con el entrenamiento de fuerza, pero no con cualquier programa de entrenamiento de fuerza. El uso de cargas ligeras (30% de 1 RM) no supone un aumento en la producción de GH, en cambio entrenamientos con cargas pesadas de 10 ó 12 repeticiones máximas conllevan un gran vertido de GH y este vertido es mucho mayor si el tiempo de recuperación entre series se reduce (1-2 minutos). Por otra parte, conforme aumentan las cargas, de 10 a 5 repeticiones máximas, el vertido de GH vuelve a reducirse.

Esto nos lleva a pensar que para conseguir un mayor vertido de GH y como consecuencia se produce una mayor hipertrofia muscular (adaptación al entrenamiento por medio de la GH). Las repeticiones máximas por serie o por ejercicio deben tener un rango entre 8/10 y 12 repeticiones máximas en adultos. Aunque no existen investigaciones concluyentes, en adolescentes este rango podría estar entre 20 y 8 repeticiones máximas.

Son necesarias futuras investigaciones para conocer la influencia de diferentes protocolos en individuos con diferentes niveles de entrenamiento, para una mejor optimización de éste en relación con esta hormona.

En estudios realizados con mujeres se ha observado un aumento en la producción de GH al principio de la fase folicular del ciclo menstrual, siendo esta producción mucho mayor que la de los hombres con el mismo tipo de entrenamiento. Esto nos plantea la posibilidad de poder realizar la periodización del entrenamiento de fuerza dentro del ciclo menstrual. En mujeres el aumento en la secreción de GH se produce bajo las mismas circunstancias en el protocolo de entrenamiento anteriormente mencionado (Komi, P.V., 1992, Kraemer, W.J., 1988)

La insulina (como factor de crecimiento)

Las adaptaciones y respuestas específicas de esta hormona al entrenamiento de fuerza no son todavía concluyentes.

La testosterona

Mediante el entrenamiento de fuerza se ha observado un aumento en las concentraciones periféricas de testosterona en sangre, durante y después del entrenamiento. Existen diferentes factores que influyen en el aumento de testosterona en sangre, entre ellos sobresalen los siguientes:

- El uso de ejercicios multiarticulares.
- Cargas pesadas (70 – 100 % de 1 RM).
- Volumen de entrenamiento de moderado a elevado.
- Entrenamientos por la tarde con preferencia sobre los de la mañana.
- La corta recuperación entre series.

Debido a la baja segregación de testosterona en las mujeres (10 a veces menor que los hombres), algunos investigadores sugieren que el uso de anabolizantes tendría un efecto más positivo que en los hombres. En la mayoría de estudios respecto a esta hormona no se ha demostrado que los diferentes métodos y programas de entrenamiento de hipertrofia utilizado en los hombres repercutiera en un aumento más significativo de la secreción de testosterona que en mujeres.

Este aumento en la secreción de testosterona a corto, medio y largo plazo produce unos efectos sobre la célula muscular (principalmente hipertrofia muscular) de radical importancia para el aumento de producción de fuerza (Ortiz, C.V. 1994).

Glucocorticoides (Cortisol)

Los estudios sobre el aumento en la secreción de cortisol son de gran importancia debido a los efectos catabolizantes que esta hormona produce sobre la célula muscular y como manifestadora del estrés metabólico (metabolismo proteico) en el entrenamiento. Consecuentemente, su control es de radical importancia en el control del sobentrenamiento, deentrenamiento y en el riesgo de lesión (Kraemer, W.J., Deschenes, M.R. & Fleck, S.J., 1988).

Catecolaminas

Cómo afecta en el entrenamiento a la respuesta de las catecolaminas no está claro. Algunas investigaciones, especialmente sobre la adrenalina, sugieren que el aumento en la producción de ésta ayuda al potenciamiento y producción de otras hormonas como la testosterona y la insulina como factor de crecimiento.

Otras hormonas

Con respecto a otras hormonas, como la hormona tiroidea, la insulina, etc, existe muy poca información disponible acerca de su respuesta al entrenamiento de fuerza, no estando su influencia clara.

BASES Y FACTORES BIOMECÁNICOS PARA LA MEJORA DE LA FUERZA Y LA POTENCIA

En este apartado vamos a profundizar concretamente en el potencial elástico del músculo junto con otros factores biomecánicos determinantes para la mejora de la fuerza y potencia. Con relación a esto debemos hacer referencia al comportamiento mecánico del tejido muscular y concretamente del sarcómero. Analizando la mecánica de la contracción de un sarcómero es posible explicar la contracción de un músculo considerándolo globalmente.

Entre las diferentes teorías de la mecánica de la contracción muscular que se han desarrollado, la que ha servido de base o fundamento para las posteriores se inspira en el modelo de los tres elementos de Hill.

En 1938, (Komi, P.V. & Bosco, C., Hill. 1987) realizó una serie de experiencias con músculos de rana, los cuales fueron estimulados hasta su tetanización. Hill obtuvo así la relación existente entre la tensión muscular y la velocidad de contracción. El procedimiento experimental fue realizado mediante el anclaje de las

inserciones del músculo a una determinada longitud inicial (L_i). Se estimuló al músculo eléctricamente para obtener una máxima tensión (T_m). Posteriormente se liberó uno de los extremos del anclaje dando lugar a una contracción con una variación de la tensión (T) y de la velocidad de contracción (V).

Con los datos obtenidos Hill formuló la siguiente ecuación:

$$(V+b) \times (T + a) = b \times (T_m + a)$$

Nota: $a, b =$ constante

Esta ecuación, generalmente, sólo es válida para las contracciones concéntricas y se ha deducido a partir de unas condiciones experimentales de tetanización sin describir la contracción muscular de forma genérica.

En el gráfico 1 observamos la relación entre la longitud inicial y la tensión máxima isométrica, cuando la longitud del sarcómero se encuentra comprendida entre 2.0 y 2.2 μm ., la tensión desarrollada es máxima, puesto que el número de puentes de actina y miosina es el más elevado.

El modelo de los tres elementos de Hill representa al músculo como un conjunto de tres elementos, dos dispuestos en serie (uno elástico y otro contráctil), y uno dispuesto en paralelo con respecto a los otros dos.

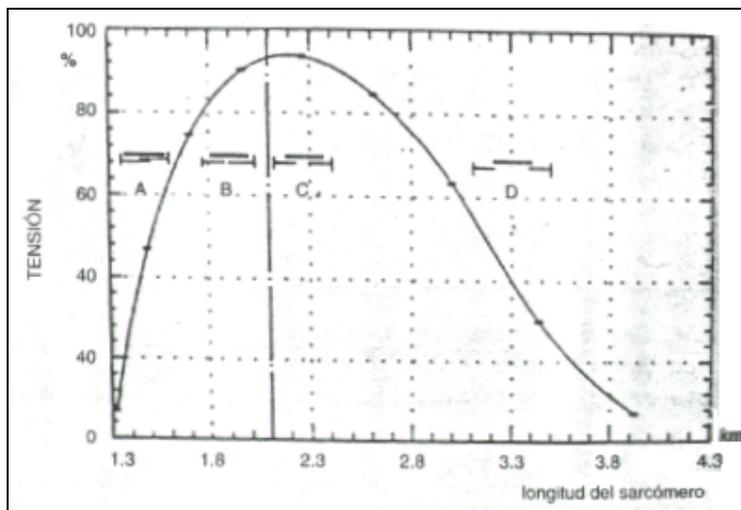


Gráfico 1. Relación entre la longitud del sarcómero y la tensión generada.

El componente elástico en serie está ligado a la elasticidad de los filamentos de actina y miosina, tiene un nivel de almacenamiento de energía elástica menor que el componente elástico en paralelo y su almacenamiento depende de la velocidad y magnitud del estiramiento en los puentes cruzados de actina y miosina. El componente elástico en paralelo está relacionado con los tejidos conectivos, endomisio, epimisio, perimisio y sarcolema. Los dos elementos colocados en serie poseen una gran interrelación, siendo difícil aislar sus características.

Existe una interrelación de los tres elementos de Hill en relación a los parámetros de fuerza muscular (tensión generada) y longitud del músculo. (ver gráfico 2)

Un papel relevante adquiere la influencia del elemento elástico en serie, el cual se localiza e identifica con los componentes intrínsecos de la elasticidad del sistema de filamentos actina-miosina y en los platos tendinosos intramusculares y tejidos tendinosos extramusculares (Cavagna, G.A., Dusman, B., & Margaria, R., 1968)

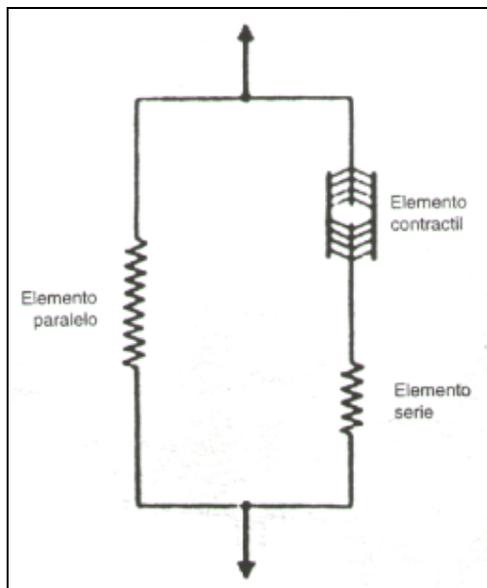


Gráfico 2. Modelo de los tres elementos de Hill.

Este elemento sólo actúa en condiciones dinámicas, dependiendo del tiempo que el músculo tarde en contraerse o generar tensión. Komi y Bosco afirman que un tiempo superior a 1-2 segundos entre la contracción excéntrica y la concéntrica conllevaría a la anulación de la actuación del elemento en serie.

Se plantea la posibilidad de generar una mayor velocidad final durante el acortamiento muscular, gracias al elemento elástico en serie (Komi, P.V., 1992).

Existen una serie de aspectos biomecánicos en los cuales se deben entrenar para producir una mejora en su funcionalidad y respuesta. Estos son los siguientes:

Ciclo acortamiento-estiramiento

En 1979 Norman, V. y Komi, P.V. y en 1984 Komi, P.V. siguiendo sus investigaciones y las realizadas por Cavagna, G.D., Cittero, T. y Vitassalo, J.T. entre otros, (Komi, P.V., 1992) establece el ciclo acortamiento-estiramiento. Cavagna demostró que cuando un músculo se le estira previamente y el tiempo que pasa entre estiramiento y contracción es corto, la tensión es mayor.

Este ciclo implica que en la contracción excéntrica, o fase de estiramiento (ej. flexión de piernas), se almacena energía en los componentes elásticos en serie en el músculo, concretamente en los puentes de actina y miosina de las fibras de contracción rápida, aumentando la fuerza generada en gran medida y produciéndose un pequeño cambio en la longitud del sarcómero. Esta energía se transfiere al trabajo realizado por el elemento contractil en la contracción concéntrica o fase de acortamiento (ej. extensión de piernas en un salto). Esto dará como resultado una mayor potencia de salto siempre que el tiempo entre la contracción concéntrica y la excéntrica sea mínimo (menor de 1 ó 2 segundos), pues, de lo contrario, esa energía elástica se pierde en forma de calor. Komi, P.V. afirma en sus conclusiones que a menor tiempo de apoyo mayor tiempo de vuelo y mejor aprovechamiento de los componentes elásticos del músculo.

La evidencia sugiere que la eficiencia mecánica es muy elevada en la fase excéntrica pero no es constante y existe una gran variación entre individuos. La contracción concéntrica se ve incrementada cuando la fase excéntrica se ve mejorada. Los resultados de investigación concluyen que la modificación y mejora de una contracción concéntrica explosiva estancada y constante en su velocidad de acortamiento se ve mejorada variando la carga o estrés producido en la fase de estiramiento o contracción excéntrica, esto se produce con una variación mediante la altura de caída o en la sobrecarga adicional en la fase de caída en los ejercicios pliométricos.

Dentro del ciclo estiramiento-acortamiento, un factor a considerar es la fatiga producida en este ciclo. Los estudios de Hoppeler et al. (1985) y Komi, P.V. (1992) revelaron que después de 100 ciclos acortamiento-estiramiento máximos, realizados con los brazos, la fatiga se caracterizaba por un aumento en el tiempo de

apoyo de las manos tanto para la contracción concéntrica como par la excéntrica. Al mismo tiempo las curvas de fuerza-velocidad dieron una caída pronunciada de la fuerza generada a partir de los 100 ciclos. En estos estudios se observó también un aumento en la contribución del reflejo miotático durante la fatiga, el cual puede indicar un intento del sistema nervioso de compensar la potencialidad del ciclo acortamiento-estiramiento mediante un aumento en la activación de las fuerzas contractiles de los músculos para resistir los impactos consecutivos en el ejercicio. Debemos considerar que existe una fatiga a corto plazo en el ciclo estiramiento-acortamiento. En el cual su eficacia está limitada por el tiempo de actuación y de entrenamiento.

No existe ninguna duda de que ejercicios especiales de salto como los pliométricos entre otros utilizan el ciclo estiramiento-acortamiento mejorando la fuerza y la potencia de los músculos implicados.

Gordon, Huxley y otros afirman con posterioridad a los primeros estudios de Komi, P.V. y Bosco, C. (1978, 1986, 1992) que el ángulo de 90 grados es el ideal para obtener una mayor utilización de la energía elástica en la flexión-extensión de un salto, aunque posteriormente Komi, P.V. (1992) afirma que existe un ángulo ideal con el que cada deportista puede generar su máxima potencia muscular. No obstante, recomienda a la vez el entrenamiento de los saltos entre 130 y 150 grados, pues son los de competición. Vitassalo, J.T. y Kurnetsov, K. (1988) establecen diferentes métodos sobrecargados (saltos con peso) para evitar la acomodación muscular de estos elementos y métodos aligerados para disminuir el tiempo de apoyo con el consiguiente aumento del tiempo de vuelo del centro de gravedad del individuo en el salto.

Recientes estudios sugieren que los músculos isquiotibiales contribuyen en gran medida a todos los movimientos explosivos y al ciclo acortamiento-estiramiento. En consecuencia, se ha sugerido un mayor énfasis de los ejercicios de isquiotibiales en los programas de pesas actuales, (Komi, P.V. 1992).

Reflejo miotático

Su actuación principal es producida en las contracciones pliométricas o con estiramiento previo. La actuación del reflejo miostático está basada en la participación del órgano tendinoso de Golgi, el cual se encuentra localizado en el tendón. Éste, unido a la actuación del componente elástico en serie, es el encargado de generar una gran tensión muscular.

Su actuación viene dada ante la aplicación de una tensión externa rápida (ej. al caer en el suelo desde un lugar elevado). Ante este tipo de situaciones el órgano tendinoso de Golgi informa rápidamente al Sistema Nervioso Central sobre el carácter y magnitud de la fuerza, ante la cual produce una contracción explosiva, generando una tensión muscular superior a la fuerza aplicada. Si la tensión externa que se ha producido es muy superior, el órgano tendinoso, una vez informado el SNC por el sistema Gamma, inhibe la contracción muscular y el músculo se relaja.

El reflejo miostático sólo es capaz de actuar ante la aplicación de una tensión externa rápida y elevada.

Velocidad de contracción muscular

La velocidad de contracción varía dependiendo del tipo de ésta. Si la contracción es concéntrica, conforme aumenta la velocidad de contracción disminuye la tensión muscular. Si la contracción es excéntrica, conforme aumenta la velocidad de contracción aumenta la tensión muscular (ver gráfico 3). La velocidad de contracción en la excéntrica es mayor que en la concéntrica, pero ésta se produce en un periodo de tiempo muy breve. Este es un factor a considerar en las programaciones de fuerza por los beneficios que aporta, pero a su vez tiene como contrapartida su alto riesgo de lesión. Su uso se ha recomendado a deportistas adultos de una alto nivel de entrenamiento.

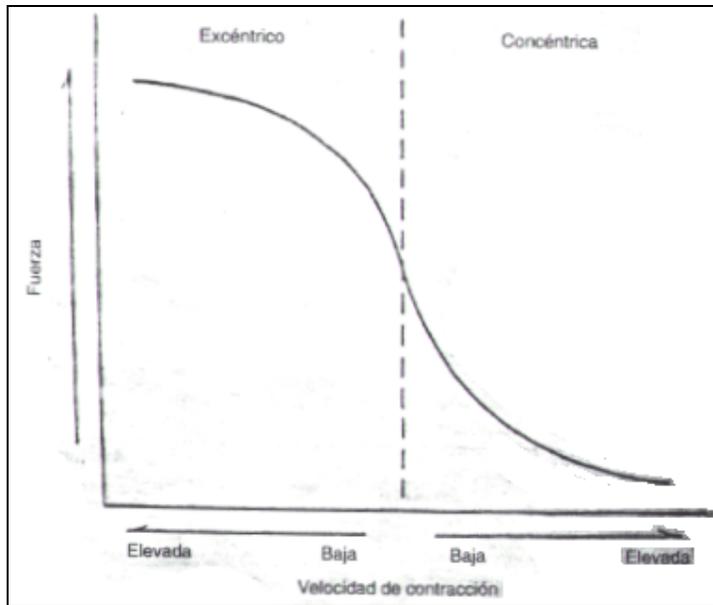


Gráfico 3. Velocidad de concentración generada y su relación con la tensión muscular en la contracción concéntrica y excéntrica

Arquitectura y disposición anatómica del músculo

Existen 3 tipos:

- Fusiformes
- Peniformes
- Bipeniformes (los más efectivos)

Estos tipos están predeterminados genéticamente y no podemos influir en el entrenamiento para su cambio.

En función de la disposición respecto al tendón, la tensión que ejercerá será más o menos efectiva.

Longitud inicial del músculo

La longitud inicial del músculo determina el número de puentes de actina y miosina que puede crear el músculo. En consecuencia vemos que:

- Músculo en estado normal: genera una tensión determinada.
- Músculo con un estiramiento previo determinado: genera una mayor tensión.
- Músculo con un estiramiento previo bajo: genera menor tensión muscular.
- Músculo con un estiramiento superior al que el músculo y tendón pueden soportar: genera una tensión inferior a la normal.

Este factor también está relacionado íntimamente con el ciclo estiramiento-acortamiento. En consecuencia, es necesario un pre-estiramiento inicial del músculo para conseguir una buena actuación del ciclo acortamiento-estiramiento.

BASES ESQUELÉTICAS

El hueso está formado por una matriz orgánica resistente, considerablemente reforzada por depósitos de sales de calcio. La matriz orgánica del hueso se compone principalmente de fibras colágenas extendidas a lo largo de las líneas y de un 5% llamado sustancia fundamental. Las fibras colágenas le dan al hueso una gran fuerza ténsil. La sustancia fundamental podría contribuir a suministrar un medio para depositar las sales de calcio.

Las sales del hueso son sales cristalinas que se depositan en la matriz orgánica del hueso y se componen principalmente de calcio y fosfato e iones de magnesio, sodio, potasio y carbonato. Cada fibra de colágeno está compuesta de segmentos periódicos que se repiten en toda su longitud, estando los cristales adyacentes a cada segmento de la fibra unidos firmemente a ella, evitando así que los cristales y la fibras colágenas se deslicen, dando así fuerza al hueso.

Las fibras colágenas tienen una gran fuerza ténsil y las sales de calcio tienen una gran fuerza de compresión. Esta combinación, junto con la unión entre fibras y cristales, le da al hueso una gran fuerza de tensión y compresión (Guyton, D.C. 1984).

Mecanismo de calcificación ósea

El proceso de calcificación ósea se inicia con la secreción de colágena y de sustancia fundamental por los osteoblastos (células que producen la formación continua del hueso y que se encuentran en las superficies óseas y en las cavidades del hueso). La colágena se polimeriza rápidamente para producir fibras colágenas y el tejido resultante se convierte en una especie de cartílago que permite la precipitación en su interior de sales de calcio. Una vez se forma este cartílago algunos osteoblastos quedan aprisionados en él. Posteriormente, las sales de calcio se precipitan en la superficie de las fibras colágenas, formándose a lo largo de la fibra de colágena nidos diminutos que se multiplican y crecen durante días y semanas hasta formar los llamados cristales de hidroxiapatita. Las sales iniciales depositadas son compuestos no cristalinos que por un proceso de sustitución y adición de átomos se reforman y pasan a ser cristales de hidroxiapatita.

En condiciones patológicas el calcio se precipita en las paredes arteriales transformándose en tubos de tipo óseo y generando la llamada arteriosclerosis.

El hueso no sólo se forma sino que también se reabsorbe y se modela continuamente. El hueso se reabsorbe continuamente por acción de un tipo de osteoblastos los cuales liberan enzimas proteolíticas y varios ácidos. Los enzimas digieren o disuelven la matriz orgánica y los ácidos provocan la solución de las sales óseas. Con excepción de la fase de crecimiento, la velocidad de formación y reabsorción del hueso es igual.

El remodelado continuo del hueso tiene como función ajustar su fuerza al esfuerzo que se le somete del tal manera que cuanto mayores son los esfuerzos más gruesos son los huesos y su forma se reorganiza según los modelos de líneas de fuerza ejercidos por el tipo de actividad. Éste es uno de los puntos por los cuales muchos investigadores sugieren que en determinadas disciplinas los deportistas deberían empezar a realizar entrenamientos específicos del deporte a edades tempranas y no una multivariedad deportiva.

Ante una fractura ósea se forman nuevos osteoblastos a partir de células madres óseas, formándose una masa voluminosa de tejido osteoblástico matriz ósea seguida posteriormente de un depósito de sales. La estimulación de los extremos óseos mediante ejercicios isométricos aumenta la actividad osteoblástica a nivel de la fractura, reduciendo en gran medida el periodo de convalecencia.

ADAPTACIONES Y RESPUESTAS ESQUELÉTICAS

El entrenamiento de fuerza altera las propiedades del hueso, los tendones y ligamentos, haciéndolos más largos, fuertes y resistentes a las lesiones. Mediante el entrenamiento de fuerza se produce un aumento en los depósitos de fósforo y calcio consiguiéndose huesos más fuertes. Los huesos fuertes son beneficiosos porque pueden proteger mejor el esqueleto ante posibles lesiones resultantes del trabajo cotidiano o de la competición deportiva. Mediante un entrenamiento de fuerza adecuando podemos minimizar el proceso osteoporótico en individuos de la tercera edad.

Refiriéndonos a la actividad física en general y al entrenamiento de fuerza en particular, hemos de decir que no todos los programas de entrenamiento producen los mismos resultados (Falch, J.A., 1982).

El entrenamiento de fuerza, al contrario que el de resistencia, afecta a la mineralización del hueso. Es más, en deportes con un alto requerimiento de fuerza como las pruebas de lanzamiento en atletismo o la lucha, sus practicantes poseen niveles de densidad ósea mucho mayor que en otros deportes con menor requerimiento de fuerza como jugadores de fútbol o rugby, siendo los corredores de fondo los deportistas con menor densidad ósea.

Los cambios hormonales producidos por el entrenamiento de fuerza influyen directamente sobre el tejido conectivo (ligamentos y tendones) y sobre el hueso. Al mismo tiempo el sobentrenamiento afecta negativamente el la segregación de determinadas hormonas y estimula otras que afectan negativamente en la estimulación de la mineralización ósea y el tejido conectivo.

OTRAS ADAPTACIONES

Este apartado quiere dar a conocer de manera breve otras adaptaciones producidas en otro sistema como es el sistema cardiovascular por medio del entrenamiento de fuerza y que influyen sobre el rendimiento de fuerza y potencia y la salud.

Adaptaciones cardiovasculares

Las adaptaciones cardiovasculares suponen una serie de cambios muy diversos a nivel cardiovascular. Adaptaciones crónicas en descanso son las pulsaciones cardíacas, presión arterial, volumen cardíaco, grosor de la pared cardíaca, dimensiones de la cámara cardíaca, volumen del ventrículo izquierdo, función sistólica y diastólica, etc. (Fleck, S.J. & Kraemer, W.J., 1987, 1988).

En referencia a las pulsaciones cardíacas, atletas altamente entrenados poseen pulsaciones cardíacas más bajas, este decrecimiento es normalmente atribuido a la combinación del incremento del tono parasimpático y a la disminución del tono simpático. El entrenamiento de fuerza produce una bajada de las pulsaciones cardíacas, aunque no en la misma medida que el entrenamiento aeróbico.

En referencia a la presión arterial, los deportistas que realizan un elevado entrenamiento de fuerza poseen niveles medios. Mediante el entrenamiento se mantiene el nivel de presión arterial o se produce una ligera disminución. No existe ninguna evidencia que sugiera que el entrenamiento de fuerza cause elevaciones en la presión sanguínea en reposo, a pesar de que el entrenamiento de pesas produzca grandes elevaciones de la presión sanguínea durante el ejercicio (ver gráfico 4).

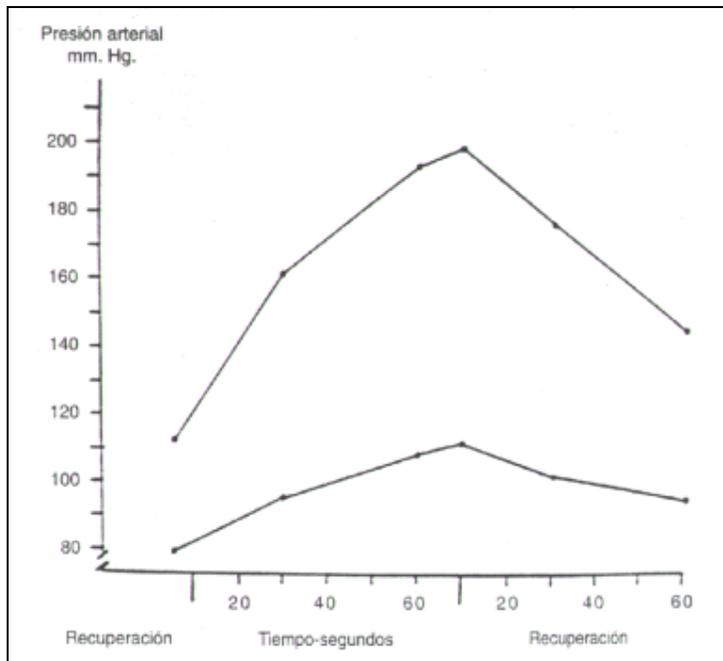


Gráfico 4. Cambios de la presión arterial antes, durante y después de un entrenamiento de fuerza

En referencia al volumen sanguíneo, atletas altamente entrenados en fuerza adquieren un mayor volumen sanguíneo debido a un aumento significativo del diámetro del ventrículo izquierdo. El entrenamiento de fuerza aumenta con el tiempo el volumen sanguíneo tanto en sístole como en diástole, aunque no en la medida que el entrenamiento aeróbico lo produce.

En referencia al grosor de la pared cardíaca, su aumento es debido a la adaptación al entrenamiento que produce elevada presión arterial intermitente durante el esfuerzo. El mayor o menor grosor de la pared cardíaca está relacionado con la intensidad y el volumen del entrenamiento. El entrenamiento de fuerza con cargas pesadas aumenta el grosor de la pared cardíaca, pero no de igual manera para todos los individuos.

Con relación a las dimensiones de la cámara cardíaca, su incremento es debido a un aumento del volumen de entrenamiento. A pesar de un gran aumento de volumen esta adaptación no es tan significativa como la producida mediante el entrenamiento de resistencia. Dentro del entrenamiento de fuerza, el de los culturistas da unos mayores resultados en este parámetro que el realizado en Halterofilia o Powerlifting.

Con relación a la masa del ventrículo izquierdo hemos de decir que un aumento en la pared cardíaca o en la medida del ventrículo izquierdo, o ambos, dan como resultado un aumento de la masa del ventrículo izquierdo. El incremento de la masa cardíaca mediante el entrenamiento para culturistas es el resultado de un aumento de la cámara cardíaca y de la pared cardíaca; en cambio, el entrenamiento de Halterofilia es el resultado sólo de un incremento en la pared cardíaca.

Se producen cambios en el ventrículo izquierdo debido a largos periodos de entrenamiento de fuerza. Atletas con una alta preparación en el entrenamiento de fuerza poseen unas dimensiones sistólicas y diastólicas del ventrículo izquierdo altas, al igual que su volumen en relación a su área corporal. Los practicantes de Halterofilia y Powerlifting poseen un volumen de ventrículo izquierdo normal en relación a su área corporal.

En referencia a la función sistólica, y diastólica, la mayoría de la información disponible indica que no existe ningún efecto del entrenamiento de fuerza negativo ni sobre la función sistólica ni sobre la diastólica en individuos jóvenes, adultos, altamente entrenados o sedentarios no hipertensos.

Factores que influyen en las adaptaciones al entrenamiento de fuerza y potencia

Potencial genético: básicamente está basado en el tipo y número de fibras de cada grupo muscular, las cuales vienen determinadas por el código genético. Ej: sprinter: 70-80% de fibras rápidas.

Edad: según su evolución biológica y en consecuencia sus cambios fisiológicos determinarán la fuerza del individuo.

Nivel de entrenamiento anterior: Los iniciados en el entrenamiento de pesas en comparación con los avanzados aumentan su fuerza de 2 a 3 veces más rápido que los avanzados ya que en los iniciados se están produciendo parte de las adaptaciones fisiológicas que ya los avanzados poseían.

Características del programa: según sea el tipo de programa de entrenamiento se realizarán adaptaciones de un tipo u otro.

Adecuada progresión, variación del entrenamiento, especificidad y sobrecarga.

Adecuada progresión: adecuada adaptación.

Variación: para evitar el sobreentrenamiento y mejorar la fuerza muscular es necesario variar y considerar otros factores como:

Incidencia final sobre el sistema de energía que el deporte necesita.

Economizar el tiempo de entrenamiento.

Motivar al adolescente.

Especificidad: en base a los deportes trataremos de incluir en el entrenamiento:

Premovimientos

Sistemas de energía en los que se basa la actividad deportiva.

Tipo de contracciones que se realizan en la actividad deportiva.

Conclusiones sobre las adaptaciones y su aplicatividad al entrenamiento

Habiendo revisado las respuestas y adaptaciones musculares, neuronales, bioquímicas, endocrinas y biomecánicas al entrenamiento de la fuerza (máxima, Fuerza-resistencia, explosiva o potencial) hemos clasificado los diferentes factores biológicos para la mejora de la fuerza en base a las distintas etapas de desarrollo. Al mismo tiempo hemos reseñado cuales son los estímulos más adecuados para potenciar estos factores.

Prepuberales

Actuar sobre la coordinación intermuscular mediante la utilización de ejercicios multiarticulares gimnásticos con el propio peso corporal, olímpicos o parte de ellos con peso muy ligero y pocas repeticiones que busquen una gran coordinación y variedad de movimientos (no superior a 8 repeticiones) y con un volumen de entrenamiento muy bajo (20-40 minutos 2 veces semanales).

Puberales y adolescentes (11 a 16 años)

Actuar sobre el factor de sincronización de las unidades motoras a través de un adecuado entrenamiento mental realizando ejercicios explosivos mediante el entrenamiento pliométrico.

Actuar sobre la coordinación intermuscular mediante la utilización de ejercicios multiarticulares gimnásticos, olímpicos o parte de ellos con bajo peso.

Actuar sobre la inhibición neuromuscular mediante el uso adecuado de ejercicios explosivos y mediante la utilización del PNF (facilitación neuromuscular propioceptiva) como método de estiramiento y eliminación de la inhibición neuromuscular.

Actuar sobre los componentes elásticos del músculo en la realización de ejercicios explosivos mediante los ejercicios pliométricos y ejercicios multiarticulares de fuerza.

Adolescentes (15/6-18) y adultos

Actuar sobre los factores anteriormente mencionados.

Actuar sobre el número, frecuencia de impulsos nerviosos y la inhibición neuromuscular mediante el uso de cargas pesadas y de pocas repeticiones.

Realizar un preestiramiento en determinados ejercicios a la hora de que el músculo pueda generar una mayor tensión.

Tener en cuenta el uso controlado de las contracciones excéntricas como factor de aumento de la tensión muscular (en adolescentes).

Empezar a hacer hincapié en el factor de hipertrofia mediante el aumento del número de series, cargas medias y cortos tiempos de recuperación entre las series (en adultos se sugiere hacer más hincapié en el factor de hipertrofia).

BIBLIOGRAFÍA

- Alway, S.E., MacDougall, J.D., Sale, D.G., Sutton, J.R. & McComas, A.J. (1988). Functional and structural adaptations in skeletal muscle of trained athletes. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 64, pp. 1114-20.
- Allerheiligen, B., Edgerton, R., Hayman, B., Kuc, J. Lambert, M., MacDougall, J.D., O'bryant, H., Pedemonte, J., Sale, D., Tesch, P., Vermeil, A., Wayne L. (1993) Determining factors of Strength – part 1. *NSCA Journal*. Vol, 15, nº 1, pp. 9-22.
- Allerheiligen, B., Edgerton, R., Hayman, B., Kuc, J. Lambert, M., MacDougall, J.D., O'bryant, H., Pedemonte, J., Sale, D., Tesch, P., Vermeil, A., Wayne L. (1993) Determining factors of Strength – part 2. *NSCA Journal*. Vol, 15, nº 1, pp. 23-31
- Astrand, P. O. & Rodahl, K. (1986). *Textbook of Work Physiology. Physiological Bases of Exercise*, 3rd edn. McGraw-Hill International Editions, New York.
- Cavagna, G.A., Dismann, B & Margaria, R. (1968). Positive work done by a previously stretched muscle. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 24, pp. 21-32.
- Cavagna, G.A., Dismann, B & Margaria, R. (1968). Positive work done by a previously stretched. *Journal of Biomechanics*. Vol. 24 (1), pp. 21-32.
- Chang, F., Dodds, W., Sullivan, M., Kim, M. & Malarkey, W. (1985). The acute effects of exercise on prolactin and growth hormone secretion: comparison between sedentary women and women runners with normal and abnormal menstrual cycles. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. Vol. 62, pp. 551-6.
- Falch, J.A. (1982). The effects of physical activity on the skeleton. *Scandinavian Journal of Social Medicine*, (suppl. 29), pp. 55-8.

- Fleck, S.J. & Kraemer, W.J. (1987). Designing Resistance Training Programmes. Human Kinetics, Champaign, Illinois.
- Fleck, S.J. & Kraemer, W.J. (1988). Resistance Training: Physiological responses and adaptations. Part 2. Phys. Sports medicine. Vol. 16, pp. 188-124.
- Fleck, S.J. & Kraemer, W.J. (1988). Resistance Training: Physiological responses and adaptations. Part 3. Phys. Sports medicine. Vol. 16, pp. 53-74.
- Fiorini, J.R. (1987). Hormonal control of muscle growth. Muscle and Nerve, Vol. 10 pp. 577-98
- Guyton, A.C. (1984). Tratado de Fisiología médica. 6ª. Edición. Nueva editorial Interamericana, S.A.
- Hakkinen, K., Komi, P.V., Alem, M. & Kauhamen, H. (1987). EMG, muscle fiber and force production characteristics during 1 year training period in elite weight-lifters. European Journal of Applied Physiology. VI. 56, pp. 419-27.
- Hoppeler, H. & Lindstedt, S.L. (1985). Malleability of skeletal muscle in overcoming limitations: Structural elements. Journal of Experimental Biology, Vol. 115, pp. 355-64.
- Kraemer, W.J. (1988). Endocrine responses to resistance exercise. Medicine and Science in Sports and Exercise, Vol. 20 (suppl.), pp. 152-7
- Kraemer, W.J., Deschenes, M.R. & Fleck, S.J. (1988). Physiological adaptations to resistance exercise implications for athletic conditioning. Sports Medicine, Vol. 6, pp. 246-56.
- Kernell, D. (1986). Organization and properties of spinal motoneurons and motor units. In H-J. Freund, U. Buttner, B. Cohen & J. Noth (eds). Progress in Brain Research. Vol. 66, pp 21-30. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Komi, P.V. (1986). Training muscle strength and power: interaction of neuromotoric, hypertrophic, and mechanical factors. International journal of Sports Medicine. Vol. 7 (suppl. 1), pág. 10.
- Komi, P.V. (1992) Strength and Power in Sport. Blackwell Scientific Publications.
- Komi, P.V. & Bosco, (1978). Utilization of stored elastic energy in jumping and its relation to skeletal muscle fiber composition in man. Medicine and Science in Sports. Vol. 10 (4), pp. 261-265.
- Kyrolainen, H., Komi, P.V., Oksanen, P., Hakkinen, K., Cheng, S. & Kim, D.H. (1990). Mechanical Efficiency of locomotion in females during different kinds of muscle action. European Journal of Applied Physiology. Vol. 61, pp. 446-52.
- Narici, M.V., Roi, G.S., Landoni, L., Minetti, A.E. & Cerretelli, P. (1990). Changes in force, cross-sectional area and neuronal activation during strength training and detraining of the human quadriceps. European Journal of Applied Physiology, Vol. 59, pp. 310-19.
- Ortiz, C.V. (1994). Testosterona: efectos fisiológicos en el organismo y sus respuestas al entrenamiento de fuerza. Apunts, Julio, nº 37.
- Tesch, P.A., Throsson, A & Kaiser, P. (1984). Muscle capillary supply and fiber type characteristics in weight and power lifters. Journal of Applied Physiology, Vol. 56, pp. 35-8.
- Stone, M.H., Fleck, S.J., Triplett, N.R. & Kraemer, W.J. (1991). Physiological adaptations to resistance training exercise. Sports Medicine, Vol. 11, pp. 210-31.
- Vitasalo, J.T. (1988). Evaluation of explosive strength for young and adult athletes. Research Quarterly for Exercise and Sport, 59 (1), pp. 9-13.

Criterios Generales para la Mejora de la Fuerza mediante Sobrecargas

S. Beraldo y C. Polletti

Entendemos por fuerza muscular la capacidad de desarrollar tensiones elevadas. Podemos también definir la fuerza como la facultad de vencer una resistencia externa o bien de oponerse a ella con un esfuerzo muscular (véase pág. 71 y siguientes).

La fuerza muscular puede ser evidenciada:

- sin modificar la longitud del músculo (condición estática o isométrica);
- con reducción de la longitud (condición isotónica, superante, concéntrica);
- con alargamiento contrastado (condición excéntrica, pliométrica, cedente).

Para analizar la relación existente entre la fuerza y velocidad resulta indispensable conocer la relación entre fuerza y masa, entendiendo por masa los instrumentos deportivos que son objetos de levantamiento o lanzamiento.

Resulta evidente que el peso del instrumento será un condicionante respecto a la posibilidad de actuar con rapidez sobre el mismo y, por tanto, tenemos que fuerza y velocidad asumen entre sí una relación inversamente proporcional.

El gráfico sobre relación entre fuerza y la velocidad nos lleva a establecer algunas consideraciones importantísimas:

- El punto A representa el límite de máxima expresión de la fuerza. La velocidad de ejecución es nula y, por tanto, la acción se manifiesta contra una resistencia fija (tensión isométrica).
- El punto B representa la máxima velocidad del movimiento posible. La carga es nula (salvo el peso de la parte del cuerpo en acción) y la expresión de la fuerza casi lo es también;
- Al 35% de la carga máxima (diagrama central) se obtienen los valores óptimos de máxima expresión de la potencia (fuerza \times velocidad). Esto resulta cierto en la economía del movimiento pero no siempre en los sistemas de entrenamiento de las mismas;
- Superada la ordenada de la fuerza (más allá del punto A) para obtener tensiones de fuerza superiores a la isométrica, se debe entrar en el campo de la velocidad negativa (contracción excéntrica cedente, pliométrica en la fase de inversión del movimiento)

En la práctica cabe decir:

- Cuanto más elevada es la velocidad de ejecución más reducida es la fuerza ejercida. La ausencia total de carga es el presupuesto para el movimiento más veloz posible.
- Cuanto más elevada es la tensión muscular (carga) más reducida es la velocidad de ejecución. La carga máxima es el presupuesto para el desarrollo de tensiones máximas.
- Cabe obtener unas tensiones todavía más elevadas con un esfuerzo muscular excéntrico cedente y en la acción pliométrica, esta última con rápida inversión del movimiento. La velocidad alcanzará valores negativos.
- La máxima potencia del movimiento se alcanza con tensiones del 35% aproximadamente respecto al máximo efectuado a la velocidad máxima. Los sistemas de entrenamiento de la potencia prevén, no obstante, cargas muy superiores.
- El incremento de la potencia cabe obtenerlo (siendo fuerza \times velocidad) elevando ya sea los índices de fuerza o bien los de velocidad (curva externa de trazos del gráfico). Siendo no obstante la velocidad básica difícilmente incrementable (máximo 18-20%), podemos actuar con decisión sobre la elevación de la fuerza máxima.

MANIFESTACIONES DE LA TENSIÓN MUSCULAR.

Las manifestaciones de la tensión muscular pueden ser clasificadas en:

Grupo I

Manifestaciones de tensión cíclicas o acíclicas caracterizadas por un esfuerzo de tensión media o elevada a la resistencia externa a superar.

1. manifestación de tensión tónica, fuerza absoluta (máxima o submáxima), cuando la carga o la resistencia externa alcanzan el máximo o casi de la capacidad contráctil del músculo. La contracción es relativamente larga.
2. manifestación de tensión fásica, fuerza resistente, surge cuando existe un esfuerzo medio de la musculatura expresado dinámicamente y desarrollado en forma cíclica.
3. manifestación de tensión fásico-tónica, constituye el compendio de las dos precedentes.

Grupo II

Manifestaciones explosivas, cuyo máximo nivel del esfuerzo de la fuerza se alcanza con mucha rapidez.

4. Manifestación de tensión explosivo-tónica (fuerza explosiva), resulta típica cuando la carga o la resistencia externa son relativamente elevadas y la musculatura se contrae con rapidez pero la ejecución resulta relativamente prolongada y la mayor rapidez de ejecución se alcanza al término del movimiento cuando ya ha sido superada la inercia de la carga.
5. Manifestación explosivo-balística (fuerza velocidad explosiva), surge cuando la carga o la resistencia externa tienen valor bajo y el uso de la fuerza es máximo con contracción rapidísima de la musculatura.
6. Manifestación explosivo-reactivo-balística (fuerza velocidad explosiva, capacidad reactiva), cuando se supera una resistencia, que no es excesiva, con esfuerzo y empleo máximo y rapidísimo de la fuerza tras una preextensión de la musculatura. Se produce una reacción elástica (pliométrica) de inversión del movimiento y, por tanto, una mayor energía de tensión.

NOTA: La fuerza explosiva se compone de tres cualidades neuromusculares:

- Fuerza absoluta: o sea la fuerza máxima;
- Fuerza inicial: capacidad de desarrollar rápidamente elevados niveles de fuerza al principio de la contracción;
- Fuerza acelerante: capacidad de intensificarla tensión con el movimiento ya iniciado.

Grupo III

Manifestaciones de tensión cíclicas o acíclicas en las cuales el uso de la fuerza es relativo y el esfuerzo de tensión elevado o instantáneo resulta proporcional a la poca elevada resistencia que debe superarse.

7. Manifestación de tensión veloz acíclica (expresada en fuerza velocidad), aparece cuando existe una rapidez de ejecución de un único movimiento.
8. Manifestación de tensión veloz cíclica (fuerza velocidad resistente), se manifiesta cuando el músculo se contrae de un modo repetido y veloz en una acción rítmica.

Resulta fundamental considerar la forma en que el aumento del potencial de fuerza muscular viene determinado por la coordinación intra e intermuscular. La coordinación intramuscular, desarrollable a través de cargas del 70-80% del máximo efectuadas a la máxima velocidad repetitiva y cargas del 85 al 95-100% del máximo, constituye el mecanismo donde se manifiesta un aumento de la frecuencia de estímulo de las motoneuronas, su sincronización y un incremento numérico de intervención simultánea y rapidísima de unidades motrices (sobre todo rápidas).

La coordinación intermuscular, obtenible principalmente con cargas por debajo del 80% del máximo y aplicadas lentamente, consiste esencialmente en la utilización óptima de las diversas sinergias musculares que apoyan el esfuerzo desarrollado por los músculos agonistas principales. Con este tipo de esfuerzo, al no obtenerse una rápida utilización de las unidades motrices y a pesar de que resulta óptimo para la construcción

básica, el resultado será negativo para los atletas formados que necesitan unos elevados niveles de fuerza velocidad y fuerza explosiva.

Por lo que se refiere a la relación entre fuerza y peso del cuerpo, tal circunstancia se manifiesta de un modo tanto mas claro cuanto mas elevada es la calificación de la persona. Resulta necesario subrayar, por otra parte, que las personas con una masa superior pueden desarrollar una fuerza mayor.

Tendremos, por consiguiente, dos tipos de fuerza, la relativa, que comprende el valor de la correspondiente a 1 Kg. de peso corporal, y a la absoluta, que es la desarrollada por la persona en cualquier movimiento e independientemente de su peso corporal.

En las disciplinas que prevén categorías de peso, la fuerza relativa es la que asume una importancia mayor. El aumento de tal fuerza debe quedar vinculado a las variaciones de la masa corporal, y sólo en las categorías de peso sin limite, la fuerza absoluta constituye el elemento mas importante.

Actualmente en la FILPI, tanto para las presentaciones específicas de arrancada y envión como para las de ejercicios normales con sobrecargas, se utiliza la TABLA INTERNACIONAL elaborada por Ron Sinclair, al objeto de evaluar el levantamiento de un peso con relación al peso corporal del atleta.

Métodos para crear tensiones de fuerzas óptimas

Existen esencialmente tres métodos para crear tensiones de fuerzas optimas:

ESFUERZOS REPETIDOS

Carga de intensidad medio-alta entre el 70 y el 80% del máximo alcanzado a nivel de agotamiento (máximo número posible de repeticiones para cada serie). El número mínimo de series por ejercicio es de 5-6, con recuperación entre ellas de 2,5-3 minutos.

Este método, después de algunos meses de entrenamiento con cargas mas bajas, se presta magníficamente para los principiantes y los muy jóvenes. En este caso, sin embargo, no se debe llegar hasta la situación de cansancio total en ninguna serie sino detenerse en la penúltima repetición posible.

Para los atletas formados constituye un método alternativo que permite la superación del umbral de intervención de fibras, incluso con un umbral mas elevado. De hecho, además de la coordinación intermuscular o bien la evidencia del potencial máximo de fuerza obtenido utilizando la mejor coordinación de intervención entre los diversos músculos agonistas y sinérgicos de dicho movimiento, el cansancio provocado hace entrar en acción un número elevado de unidades motrices (incluso las que cuentan con un umbral de respuestas mas elevado), creando ulteriores estímulos para el incremento de la fuerza máxima. No habitúa, sin embargo, a la intervención rápida de mas unidades motrices posibles, capacidad ésta que resulta estimulada por los dos métodos expuestos a continuación.

ESFUERZOS DINAMICOS

Carga entre el 55 y el 80% del máximo aplicada al limite de la velocidad de ejecución en fase concéntrica.

En el ámbito de la misma serie, la ejecución se suspende apenas se reduce la velocidad con relación a la primera repetición tomada como parámetro de referencia. Con cargas que permiten mas de 8-10 repeticiones veloces resulta, sin embargo, inútil mas allá de tal límite numérico. Se ejecutan por lo menos 5-6 series por ejercicio. La recuperación entre las series es de 3-5 minutos (completa). Con cargas superiores al 70% mejora la coordinación intramuscular o sea la utilización rapidísima y sincrónica del mayor número posible de unidades motrices en forma simultánea (fibras blancas o fásicas).

Este método queda reservado a los atletas formados y bien entrenados respecto a la fuerza máxima y en disciplinas con características del movimiento extremadamente dinámico que requiere diversos grados de fuerza velocidad y fuerza explosiva.

ESFUERZOS MÁXIMOS

Carga submáxima y máxima del 85 al 95-100 % del máximo aplicada a ritmo medio o lento según sea el porcentaje utilizado. Mas allá del 85-90 %, el número de repeticiones para cada serie se efectúa hasta el nivel de agotamiento (número total posible), las series para cada ejercicio van desde un mínimo de 5-6 hasta 10 o mas y las recuperaciones entre las series deben ser completas (3-5 minutos).

Este método también mejora la coordinación intramuscular habituando a la utilización rápida del mayor número posible de unidades motrices.

El método de los esfuerzos máximos resulta electivo para el desarrollo de la fuerza máxima, pero solo es indicado para atletas formados y después de un prolongado entrenamiento con cargas de valor mas bajo.

Por lo que concierne al máximo (100%) desaconsejamos su inclusión en las tablas de entrenamiento, salvo en el caso de un test o una comprobación previa a una competición. Al no renovarse en la prestación, especialmente después de unos entrenamientos muy fuertes, el atleta podría perder la confianza en sus posibilidades y en el método utilizado.

Un método optimo de control de la mejora del limite de fuerza, sin incurrir en posibles traumas y también para conocer indirectamente el máximo alcanzable, es el de comprobar si se ha producido un aumento de repeticiones posibles con una carga media o medianamente elevada. Del número de repeticiones efectuadas resulta, de hecho, labor fácil determinar cuál es el máximo posible.

INCREMENTO MÁXIMO DE FUERZA MUSCULAR

El incremento máximo de fuerza muscular se obtiene teniendo siempre presentes los principios siguientes:

- La tensión muscular debe ser máxima, procede exigir la máxima sincronización posible de las fibras (método de los esfuerzos máximos y esfuerzos dinámicos).
- El recorrido articular debe ser, en lo posible, completo. De este modo el músculo trabaja durante un período de tiempo mayor con tensiones elevadas. El esfuerzo también se desarrolla, por otra parte, en los ángulos articulares mas desfavorables para la manifestación de fuerza.
- Se debe alcanzar, en cada una de las series ejecutadas (a ritmo lento), la situación fisiológica de agotamiento. Cuando se ejecuta un determinado ejercicio con un peso elevado, siempre es necesario llevar a cabo, en todas las series previstas, el mayor número posible de repeticiones, manteniendo como es obvio una posición correcta y una trayectoria de ejecución. Los mecanismos útiles para alcanzar un incremento de la fuerza sólo entran en acción en el último 15 % del número de repeticiones efectuadas hasta el nivel de agotamiento.
- Ningún método se utiliza monolateralmente sino que cada unos de ellos debe alternarse periódicamente en la tabla de entrenamiento. De hecho, el sistema neuromuscular, aún cuando se vea sujeto a la acción de cargas elevadas pero siempre ajustándose al mismo método, tiende a estabilizarse sobre los valores de fuerza alcanzados. Sea como fuere resultan posibles unos ulteriores incrementos actuando sobre parámetros tales como porcentaje de peso, ritmo de ejecución, reducción de las recuperaciones , etc.

Por otra parte es muy conveniente recordar que:

- Con unos estímulos iguales al 20 % del peso máximo que se puede levantar se obtiene una reducción de la fuerza (el uso que se hace de la fuerza muscular en la actividad rutinaria y cotidiana del hombre tipo medio es igual a un 30-40%);
- La disminución de la fuerza se encuentra en relación directa con el débil grado de aplicación sistemática de la misma;
- Con unas tensiones musculares elevadas de carácter habitual, la disminución de la fuerza puede iniciarse incluso en el caso de utilización de cargas relativamente pesadas pero inferiores a las del nivel usual;
- Para un deportista que se entrena constantemente con pesas correspondientes al 70-85 % del máximo que es capaz de levantar, sin alcanzar en la última repetición el nivel de cansancio (agotamiento), cabe que se presente un cese del incremento de la fuerza durante el primer mes y una disminución de la misma igual a un 5-7 % durante el segundo mes;

- En el periodo competitivo la fuerza disminuye si no se efectúan ejercicios de incremento o mantenimiento aun cuando se continúe el entrenamiento con ejercicios complementarios;
- No deben descuidarse los ejercicios con pesas de tipo bajo y medio, sobre todo en fase de aprendizaje y consolidación del movimiento atlético, ya que solo con este tipo de cargas resulta posible llegar a una ejecución perfecta de los movimientos y alcanzar asimismo u buen incremento de fuerza general. Por otra parte tenemos que las estructuras pasivas (tendones, huesos, cartílagos y ligamentos) reaccionan con una adaptación positiva, gracias a la cual las futuras cargas de carácter mas elevado se verán absorbidas en forma optima y sin incurrir en traumas. Estas estructuras requieren, de hecho, el triple de tiempo de adaptación respecto al músculo, el cual, en cambio, ya adquiere fuerza después de las primeras semanas de entrenamiento.
- En el caso de una interrupción prolongada del ciclo de entretenimiento se presenta un periodo de deterioro, tanto de la condición de forma como de la fuerza muscular. Cabe decir empíricamente que: la fuerza adquirida tras un tiempo de entrenamiento tiende volver a la situación inicial al cabo de poco y que cuanto mas rápido ha sido su incremento tanto mas lo será su reducción. Después de transcurridas 70 horas aproximadamente desde el último entrenamiento se inicia la disminución de la fuerza adquirida.

PARÁMETROS BÁSICOS PARA LA MEJORA DE LA FUERZA MEDIANTE EL USO DE SOBRECARGAS

Con el término sobrecarga deben entenderse todos los elementos cuyo fin es el de crear tensiones musculares idóneas al objeto de incrementar las capacidades condicionales del organismo.

Los elementos mas usados son:

- Balones medicinales (distintos pesos), barras de hierro (distintos pesos), chalecos, zapatos y cinturones lastrados;
- Muelles y bandas elásticas (de tipo graduable);
- Arcos, garruchas, poleas excéntricas, máquinas electrohidráulicas, tabla isométrica;
- Pesas y halteres.

Los parámetros que siempre se tienen presente son:

1. La correcta ejecución del ejercicio: incluso las cargas elevadas, si se afrontan con un entrenamiento progresivo y gradual, no comportan riesgo de lesiones musculotendinosas y articulares. La ejecución técnica correcta, aparte de permitir una máxima eficacia del movimiento, constituye un medio seguro de prevención de traumatismos.

En general se deberá:

- Mantener siempre la espalda recta;
- Efectuar un buen calentamiento muscular, ya sea general o específico para el movimiento, iniciándolo siempre con cargas progresivas a partir del 40-50% respecto al máximo;
- Cuando surge un cansancio general excesivo, evitar continuar el entrenamiento con cargas elevadas;
- Respetar las señales de alarma dadas por unas eventuales sensaciones de dolor. Pasar entonces a otro ejercicio o simplemente suspender el entrenamiento.

Para la columna vertebral deberán tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

- No exagerar, en una misma sesión, con mas ejercicios de los debidos dado el riesgo de sobrecarga de la columna vertebral;
- Mantener siempre la espalda recta;
- Evitar traslaciones del cuerpo con pesos sobre la espalda;
- Utilizar, siempre que sea posible, ejercicios con el cuerpo apoyado sobre una tabla u otro elemento similar;
- En los ejercicios en posición recta, tener siempre los pies apoyados en el suelo y sobre toda la planta;

- Efectuar, entre los diversos ejercicios, 3-4 de estiramiento.
2. La elección de los ejercicios: en los principiantes se robustecerán primero los músculos del tronco y, después, los de las extremidades. Tras ello, y a medida que transcurra el tiempo, se seleccionarán unos cuantos ejercicios relativos a los grupos musculares relacionados específicamente con una disciplina deportiva determinada. Destaquemos, asimismo, que un esfuerzo general de formación no debe ser jamás inferior a 1-2 años a partir del inicio en el uso de las pesas y que mantendrá su validez incluso a su continuación de unos periodos particulares de entrenamiento.
 3. Las repeticiones y las series: constituyen el núcleo básico del entrenamiento. Por repeticiones se entiende el número de veces que se realiza un mismo movimiento sin interrupciones; recibiendo el nombre de serie cada vez que se realiza un ciclo ininterrumpido de ellas. Ejemplo:

$\frac{75\%}{8}$	$\frac{80\%}{6}$	$\frac{85\%}{4}$	$\frac{90\%}{2}$	(% respecto al máximo) (repeticiones para cada una de las 4 series)
------------------	------------------	------------------	------------------	---

El número de series se encuentra en relación con la cantidad neuromuscular buscada. Un mismo grupo muscular requiere, en una misma sesión de entrenamiento, por lo menos 5-6 series para resultar estimulado o activado adecuadamente, y así tenemos:

- Fuerza máxima, por lo menos 6-7 series
- Fuerza resistente, por lo menos 4-6 series
- Fuerza velocidad, por lo menos 5-6 series
- Hipertrofia, por lo menos 5-6 series

Es de todo punto obvio que el número de entrenamientos semanales, para un mismo grupo muscular, condiciona así mismo el número de series. A este respecto cabe subrayar que cuanto se acaba de exponer refiérase a una frecuencia de entrenamientos trisemanales y siempre concerniente a la estimulación del mismo grupo muscular.

4. La intensidad del peso y el ritmo de ejecución: existen esencialmente dos modalidades de ejecución de los ejercicios con pesas: ritmo medio y lento y ritmo lo mas veloz posible. En el primer caso, debido a que los pesos son bajos o submáximos, el movimiento aparece bien controlado con respiración completa cada tres- cuatro repeticiones o más (carga muy baja). Resulta esencial, después de haber seleccionado el peso porcentualmente justo, llegar en cada una de las series programadas hasta el nivel de <cansancio> o >agotamiento> por lo menos hasta la última repetición posible. De hecho, es en el último 15% de las repeticiones posibles que se producen los estímulos supercompensatorios buscados del músculo. En los muy jóvenes y los principiantes, aparte del hecho de que la carga no debe sobrepasar el 70-75% del máximo, resulta conveniente no llegar inicialmente al agotamiento total sino detenerse dejando un margen de 1-2 repeticiones. En el caso de un esfuerzo efectuado al ritmo mas rápido posible, caracterizado por la fuerza velocidad y la fuerza explosiva, cada repetición, y para cada serie prevista, se realiza a la máxima velocidad de ejecución. Se detiene solamente cuando la velocidad comienza a descender tomando como parámetros de referencia la repetición de inicio de serie. Con cargas que permiten más de 8-10 repeticiones veloces, resulta del too inútil ir mas allá de dicho límite numérico. Considerando cada repetición aisladamente, los ritmos de ejecución pueden ser clasificados en:

_rápido	= duración total por debajo de 1,5 segundos;
_medio	= duración en torno a 2,5 segundos;
_lento	= duración en torno a 3,5 segundos;
_lentísimo	= duración desde 6 segundos en adelante.

Sea cual fuere el ritmo de ejecución, siempre es necesario efectuar el descenso con la carga (fase excéntrica) de forma lenta y controlada.

Las definiciones de carga, referidas al máximo que se pueden levantar, son:

_ Máxima	= 100%
_ Submáxima	= 95-90%
_ Elevada	=90-80%
_ Medianamente elevada	=80-70%
_ Media	=70-60%
_ Baja	=60-50
_ Muy baja	=50-40
_ Bajísima	= menos de 40%

A cada porcentaje de peso utilizado y su relativo ritmo de ejecución corresponden unas respuestas neuromusculares que pueden resumirse en las dos tablas siguientes:

Ritmo de ejecución lento y medio hasta el agotamiento (-) de las repeticiones en las series

Carga en % referida al máximo	Número máximo de repeticiones posibles	Cualidades neuromusculares interesadas
85-100%	100%=1 95%=1-2 90%=2-3 85%=4-5	Arco porcentual óptimo para el incremento de la fuerza máxima y coordinación intramuscular, especialmente si a tal método se une el de los esfuerzos dinámicos (65-80% del máximo de la velocidad). Recuperación completa tras las series. Ulterior incremento de los diámetros transversales por la implicación de fibras de umbral muy elevado. Unido al método de los esfuerzos dinámicos se encuentra el arco de esfuerzo óptimo para las disciplinas deportivas de movimiento cíclico o acíclico anaeróbico aláctico con máxima tensión muscular mantenida en torno a los 8-10 segundos aproximadamente.
70-80%	80% = 6-7 75% = 8-9 70% =10-11	Buen incremento de la fuerza máxima gracias a la carga todavía elevada y el mecanismo de agotamiento que permite la rotación de intervención de la fibras y la superación de umbrales más altos. Coordinación intramuscular, recuperación completa tras las series. Arco porcentual óptimo para el incremento de los diámetros transversales especialmente con ejecución lentísima y breves recuperaciones entre las series (45-90 segundos). Unido al método de los esfuerzos dinámicos (55-65% del máximo) se encuentra el arco de esfuerzo óptimo para las disciplinas con cíclico o acíclico anaeróbico láctico de elevada intensidad muscular en torno a los 15-30 segundos aproximadamente. Abreviando las recuperaciones entre las series (45-90 segundos) se crea mayor cantidad de ácido láctico y resistencia a éste (resistencia láctica) a tensiones medioelevadas.
50-65%	65% = 12-14 60% = 15-16 55% = 17-20 50% = 21-25	Arco porcentual óptimo para el desarrollo de la fuerza-resistencia y de la coordinación intermuscular. Recuperación de 1,5 – 2,5 minutos entre las series. Escaso incremento de la fuerza y de los diámetros transversales en los atletas formados. Unido al método de los esfuerzos dinámicos (40-55% del máximo) se encuentra el arco de esfuerzo óptimo para las disciplinas deportivas con movimiento cíclico anaeróbico láctico de media-baja intensidad muscular en torno a los 30-45 segundos. Abreviando las recuperaciones entre series (45-90 segundos) se crea mayor cantidad de ácido láctico y resistencia al mismo (resistencia láctica) a tensiones medio-bajas.
30-40%	Más de 30	Implicación de la resistencia aeróbica. Insignificante estímulo para la fuerza y para los diámetros transversales. Bajo desarrollo de la fuerza-resistencia. Recuperación de 1,5-2,5 minutos entre las series. Arco de esfuerzo óptimo para la mejora de la resistencia específica local en disciplinas con movimiento cíclico con una modesta implicación muscular mantenida durante más de 3 minutos. Abreviando las recuperaciones entre las series (40-90 segundos) se crea mayor cantidad de ácido láctico y resistencia al mismo (resistencia láctica) con tensiones bajísimas.

* Si no se consigue alcanzar el número de repeticiones previstas ello significa:

- poca recuperación entre las series
- movimiento incorrecto:
- escaso hábito de esfuerzo con dicho porcentaje de carga;
- falta de entrenamiento.

(-): agotamiento: máximo número de repeticiones posible, con una carga determinada, en el ámbito de una serie.

Ritmo de ejecución lo más veloz posible

Carga en % referida al máximo	Número máximo de repeticiones aconsejadas	Cualidades neuromusculares interesadas
85-100%	imposibles	= = = = = = =
65-80%	80% = 1 75% = 2-3 70% = 4-5 65% = 6-7	Máximo desarrollo de la fuerza explosiva, sobre todo si va unido al método de los esfuerzos máximos (85-100% del máximo). Recuperación completa entre las series. «Resistance» o bien resistencia anaeróbica con tensiones rapidísimas y elevadas de breve duración. El incremento de los diámetros transversales es modesto e involucra exclusivamente a las fibras blancas.
50-60%	60% = 8-9 55% = 10 50% = 10	Mejora óptima de la fuerza rápida. Recuperación completa entre las series.
40-45%	45% = 10 40% = 10	Fuerza rápida de baja intensidad. Recuperación completa entre las series.

* El ritmo de ejecución debe ser siempre el más veloz posible en todas las repeticiones de cada serie. El descenso con la carga, no obstante, debe resultar siempre medianamente lento y controlado. El ejercicio se interrumpe, en el ámbito de una misma serie, apenas comienza a descender la velocidad de ejecución, tomando como referencia la primera repetición de la serie. No obstante resulta aconsejable, con cargas inferiores al 55% del máximo, no superar las 10 repeticiones por serie, salvo en los esfuerzos de resistencia a la fuerza rápida y a la velocidad.

5. La amplitud del movimiento cuando se efectúan durante largo tiempo contracciones musculares en un arco de recorrido articular reducido, disminuye el componente contráctil en beneficio del tendinoso con el consiguiente acortamiento del músculo en reposo.

Esta propiedad puede dar lugar a ventajas e inconvenientes y varía en función de diversas modalidades de esfuerzo muscular:

a) La contracción y la extensión completa, es decir, el esfuerzo muscular efectuado sistemáticamente durante todo el recorrido articular posible y por tanto un movimiento amplio, tiende a hacer alargar el vientre muscular y acortar los tendones. En posición de reposo, la longitud total del músculo permanece invariable y óptima.

Este esfuerzo, por consiguiente, resulta idóneo para los músculos flexores y extensores de las extremidades, así como para los músculos pectorales y respiratorios.

b) La contracción completa y la extensión incompleta, es decir, el esfuerzo muscular efectuado en forma completa en la fase concéntrica y de un modo limitado en la fase excéntrica, tiende a hacer acortar el vientre muscular dejando invariable la longitud de los tendones. El músculo en reposo resultará más corto.

Esta última característica constituirá una ventaja para los músculos de la espalda y la estática en general por cuanto tiende a hacer asumir al cuerpo la posición correcta en fase de equilibrio posicional. También los músculos abdominales obtendrán ventaja de este tipo de esfuerzo dado que tenderán a sostener con mayor fuerza las vísceras y a hacer girar el pubis hacia delante enderezando la parte lumbar de la columna vertebral. Para las mujeres, sin embargo, esto no resulta aconsejable dado que podría alterar la lordosis natural.

c) La contracción incompleta y la extensión completa, es decir, el esfuerzo muscular no efectuado en forma completa en fase concéntrica sino solamente en fase excéntrica, provoca un acortamiento del vientre muscular y un alargamiento de los tendones. En reposo, el músculo resultará más largo. Este hecho puede resultar útil sobre todo para los músculos lumbares, cuya excesiva tonicidad y contracción en reposo es causa, a menudo, de hiperlordosis y dolores en la misma zona.

6. La recuperación entre las series de un ejercicio: depende siempre de la calidad neuromuscular buscada, por lo que tendremos:

- Fuerza máxima, 3-5 minutos o mejor recuperación total;
- Fuerza-resistencia, 1,5-2,5 minutos;
- Fuerza velocidad, 3-4 minutos;
- Hipertrofia, 45-90 segundos aproximadamente.

7. La recuperación entre los entrenamientos: el parámetro de referencia es siempre el tiempo transcurrido durante el entrenamiento de un mismo grupo muscular. Para todas las cualidades neuromusculares resulta aconsejable efectuar al menos tres entrenamientos semanales, reducibles a dos en período de competición así como para las disciplinas que utilizan las pesas como uno de los diversos medios de entrenamiento que no constituyen un fin en sí mismos (saltos, lanzamientos, ciclismo, remo, esquí, etc.) . Para la fuerza en general podemos decir que la misma disminuye al cabo de 70 horas aproximadamente desde el último entrenamiento. En la práctica se ha constatado que:

1 entrenamiento cada 15 días = inicia ya la disminución de fuerza;
1 entrenamiento cada 7 días = mantenimiento de la fuerza muscular;
2 entrenamientos cada 7 días = discreto incremento de la fuerza muscular;
3 entrenamientos cada 7 días = buen incremento de la fuerza muscular;
4 entrenamientos cada 7 días = óptimo incremento de la fuerza muscular;
5-6 entrenamientos cada 7 días = máximo incremento de la fuerza muscular (aconsejable en el caso de las pesas).

Por otra parte conviene notar que la fuerza muscular, a falta de entrenamiento, tiende a volver gradualmente a los niveles iniciales. Durante un tiempo se adquiere fuerza y en otro igual se pierde si uno se entrena.

8. La respiración durante cada serie: depende de la importancia de la carga utilizada. Con cargas superiores al 50% del máximo antes de cada repetición y espirarlo cada vez que esté terminado el movimiento. Con cargas muy ligeras, que permiten más allá de las 20 repeticiones, se puede respirar libremente o bien una respiración completa cada 3-4 repeticiones.

En las flexiones del tronco (abdominales) se espira el aire en fase de flexión y se inspira en fase de retorno.

Control muscular del movimiento

JACK H. WILMORE. DAVID L. COSTILL

Jeremy Schill, de 9 años de edad, pesaba solamente 29,5 Kg., pero esto no le impidió levantar la parte posterior del coche familiar de 1.860 Kg. del pecho de su padre. El coche se había deslizado del gato mecánico mientras Rique Schill estaba trabajando debajo de él, atrapándolo debajo del eje posterior. Cuando Jeremy comprendió que su padre estaba asfixiado lentamente, el muchacho levantó lo bastante el coche como para permitir respirar a su padre y para que su madre pudiese poner otro gato debajo del parachoques posterior.

Cuando nuestros corazones laten, cuando una comida que hemos tomado se desplaza a lo largo de nuestro cuerpo, los músculos intervienen. La miríada de funciones del sistema muscular las ejecutan solamente tres tipos de músculos:

1. Liso.
2. Cardíaco.
3. esquelético.

Los músculos lisos reciben la denominación de músculos involuntarios, porque no están directamente bajo nuestro control consciente. Se hallan en las paredes de la mayoría de vasos sanguíneos, capacitándolos para contraerse y dilatarse a fin de regular el flujo sanguíneo. Se hallan también en las paredes de la mayoría de órganos internos, permitiéndoles contraerse y relajarse, quizá para mover la comida a través de tracto digestivo, para expulsar la orina o para dar a luz a un niño.

El músculo cardíaco se halla solamente en el corazón, abarcando la mayor parte de la estructura de este. Comparte algunas características con los músculos esqueléticos, pero, igual que los músculos lisos, no se halla bajo nuestro control consciente. El músculo cardíaco se controla a sí mismo, con un mero afinamiento por parte de los sistemas nerviosos y endocrino. El músculo cardíaco se analiza plenamente en el capítulo 8. Generalmente, prestamos sólo atención a aquellos músculos que podemos controlar conscientemente. Éstos son los músculos esqueléticos, o voluntarios, denominados así porque se unen a y mueven el esqueleto. Conocemos muchos de estos músculos por sus nombres –deltoides, pectoral, bíceps-, pero el cuerpo humano contiene más de 215 parejas de músculos esqueléticos. El pulgar está controlado, él solo, por nueve músculos independientes.

El ejercicio requiere movimiento del cuerpo, lo cual se consigue a través de la acción de los músculos esqueléticos. Puesto que éste es un libro sobre fisiología del esfuerzo y del deporte, nuestro interés primordial es la estructura y la función de los músculos esqueléticos. No obstante, aunque las estructuras anatómicas de los músculos lisos, cardíacos y esqueléticos difieren un poco, sus principios de acción son similares.

ESTRUCTURA Y FUNCIÓN DE LOS MÚSCULOS ESQUELÉTICOS

Cuando pensamos en los músculos, tendemos a considerar a cada uno de ellos como una sola unidad. Esto es natural porque un músculo esquelético parece actuar como una unidad independiente. Pero los músculos esqueléticos son mucho más complejos que esto.

Si diseccionásemos un músculo, primero cortaríamos el tejido conectivo exterior que lo recubre. Esto es el **epimisio**, que rodea todo el músculo, manteniéndolo unido. Una vez cortado el epimisio, se ven pequeños haces de fibra envueltos por una vaina de tejido conectivo. Estos haces reciben el nombre de **fascículos**, es el **perimisio**.

Por último, cortando el perimisio y usando una lupa, se pueden ver las **fibras musculares**, que son las células musculares individuales. Cada una de las fibras musculares está también cubierta por una vaina de tejido conectivo, denominada **endomisio**.

Ahora que ya sabemos como encajan las fibras musculares en la totalidad del músculo, veámosla más de cerca.

PUNTO CLAVE: Una célula muscular aislada recibe el nombre de fibra muscular.

FIBRA MUSCULAR

Las fibras musculares tienen un diámetro entre 10 y 80 micrometros (um), casi invisibles para el ojo humano. La mayoría de ellas tiene la misma longitud que el músculo al que pertenecen. Esto significa que una fibra muscular en el muslo puede tener más de 35 cm de largo. El número de fibras musculares por cada músculo varía considerablemente, dependiendo del tamaño y de la función de éste.

Sarcolema

Si observamos de cerca una fibra muscular individual, veremos que esta rodeada por una membrana de plasma, denominada **sarcolema**. En el extremo de cada fibra muscular, su sarcolema se funde con el tendón, que se inserta en el hueso. Los tendones están formados por cuerdas fibrosas de tejido conectivo que transmiten la fuerza generada por las fibras musculares a los huesos, creando con ello movimiento. Por lo tanto, normalmente cada fibra muscular individual está unida, en última instancia, al hueso a través del tendón.

Sarcoplasma

Dentro del sarcoplasma, con la ayuda de un microscopio se puede ver que una fibra muscular contiene subunidades sucesivamente más pequeñas, tal como muestra la figura 2.1. De éstas, las mayores son las miofibrillas, que analizaremos separadamente. De momento, consideramos que las miofibrillas son estructuras similares a cuerdas que abarcan toda la longitud de las fibras musculares. Una sustancia similar a la gelatina llena los espacios existentes entre las miofibrillas. Es el sarcoplasma. Es la parte fluida de las fibras musculares –su citoplasma-. El sarcoplasma contiene principalmente proteínas, minerales, glucógeno y grasa disueltas, así como las necesarias organelas. Se diferencia del citoplasma de la mayoría de las células, porque contiene una gran cantidad de depósitos de glucógeno, así como un compuesto que se combina con el oxígeno, la mioglobina, que es muy similar a la hemoglobina.

Túbulos transversales. El sarcoplasma contiene también una extensa estructura de **túbulos transversales (túbulos T)**, que son extensiones del sarcoplasma (membrana de plasma) que pasa lateralmente a través de la fibra muscular. Estos túbulos están interconectados cuando pasan por entre las miofibrillas, permitiendo que los impulsos nerviosos recibidos por el sarcolema sean transmitidos rápidamente a miofibrillas individuales. Los túbulos proporcionan también caminos hacia las partes interiores de la fibra muscular para las sustancias transportadas en los fluidos extracelulares, tales como la glucosa, el oxígeno y los iones.

Retículo sarcoplasmático. Dentro de las fibras musculares se halla también una red longitudinal de túbulos, conocida como el **retículo sarcoplasmático**. Estos canales membranosos corren parejos a las miofibrillas y dan vueltas alrededor de ellas. El retículo sarcoplasmático sirve como depósito para el calcio, que es esencial para la contracción muscular. La figura 2.2 muestra los túbulos T y el retículo sarcoplasmático. Comentaremos su función con más detalles cuando hablemos sobre el proceso de la actividad muscular.

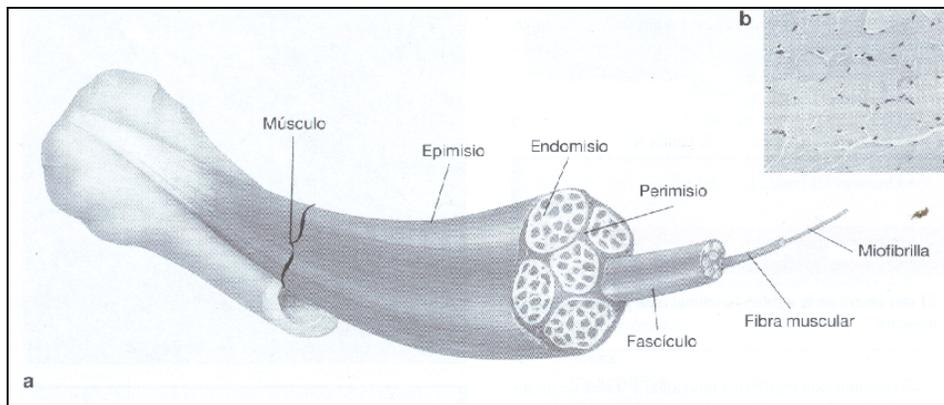


Figura 2.1 (a) La estructura básica del músculo y (b) una fotomicrografía de una sección cortada de músculo esquelético.

RESUMEN

1. Una célula muscular individual se denomina fibra muscular.
2. La fibra muscular está rodeada por una membrana de plasma llamada sarcolema.
3. El citoplasma de una fibra muscular se llama sarcoplasma.
4. La extensa red de túbulos visibles en el sarcoplasma incluye los túbulos T, que permiten la comunicación y el transporte de sustancia por toda la fibra muscular, y el retículo sarcoplasmático, que almacena calcio.

MIOFIBRILLAS

Cada fibra muscular individual contiene entre varios centenares y varios miles de **miofibrillas**. Éstas son los elementos contráctiles de los músculos esqueléticos. Las miofibrillas aparecen como largos filamentos de subunidades todavía más pequeñas: los **sarcómeros**.

Estriaciones y sarcómero.

Bajo un microscopio, las fibras musculares esqueléticas tienen una apariencia que las distingue. Debido a estas marcas, o estriaciones, los músculos esqueléticos reciben también la denominación de músculos estriados. Esto se observa también en el músculo cardíaco, por lo que éste puede considerarse como un músculo estriado.

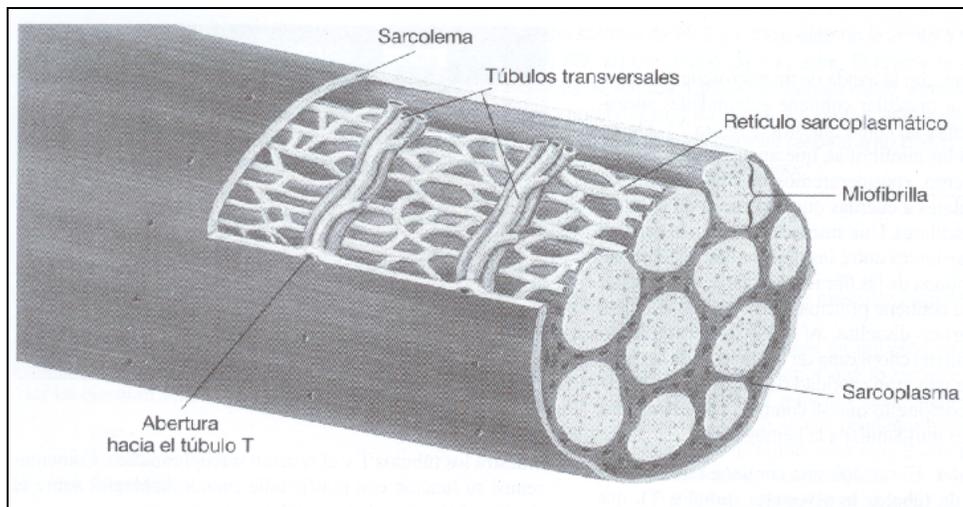


Figura 2.2 Los túbulos transversales y el retículo sarcoplasmático.

Si observamos la figura 2.3, que muestra miofibrillas, podremos ver claramente las estriaciones. Obsérvese cómo las regiones oscuras, conocidas como bandas A, se alteran con regiones claras, conocidas como bandas I. Cada banda oscura A tiene una región más clara en su centro, la zona H, que es visible solamente cuando la miofibrilla está relajada. Ahora veamos las bandas claras I. Están interrumpidas por una franja oscura conocida como línea Z.

Un sarcómero es la unidad funcional básica de una miofibrilla. Cada miofibrilla se compone de numerosos sarcómeros unidos de un extremo a otro en las líneas Z. Cada sarcómero incluye lo que se halla entre cada par de líneas Z, en la siguiente secuencia:

- Una banda I (zona clara).
- Una banda A (zona oscura).
- Una zona H (en medio de la banda A).
- El resto de la banda A.
- Una segunda banda I.

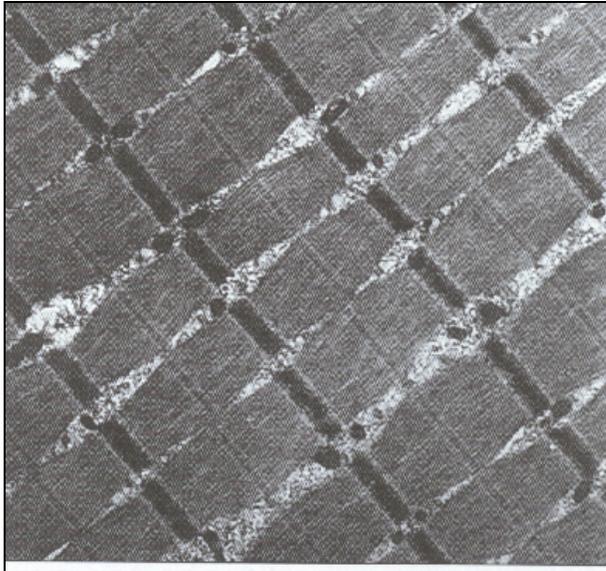


Figura 2.3 una micrografía electrónica de miofibrillas. Obsérvese la presencia de estriaciones.

PUNTO CLAVE: El sarcómero es la unidad funcional más pequeña de un músculo.

Si miramos una miofibrilla individual a través de un microscopio electrónico, podemos diferenciar dos tipos de pequeños filamentos de proteínas que son los responsables de la acción muscular. Los filamentos más delgados son la actina y los más gruesos son **la miosina**. Dentro de cada miofibrilla hay aproximadamente 3.000 filamentos de actina y 1.500 de miosina, uno al lado de otro. Las estriaciones observadas en las fibras musculares son el resultado de la alineación de estos filamentos tal como se ilustra en la figura 2.4. La banda clara I indica la región del sarcómero donde solamente hay filamentos delgados de actina. La banda oscura A representa la región que contiene tanto los filamentos gruesos de miosinas como los filamentos delgados de actina. La zona H es la porción central de la banda A, que aparece solamente cuando el sarcómero se halla en estado de reposo. Sólo está ocupada por los filamentos gruesos. La ausencia de los filamentos de actina hace que la zona H aparezca más clara que la banda A adyacente. La zona H es visible solamente cuando el sarcómero está relajado, ya que éste se acorta durante la contracción y los filamentos de actina son arrastrados hacia esta zona, dándole la misma apariencia que la banda A.

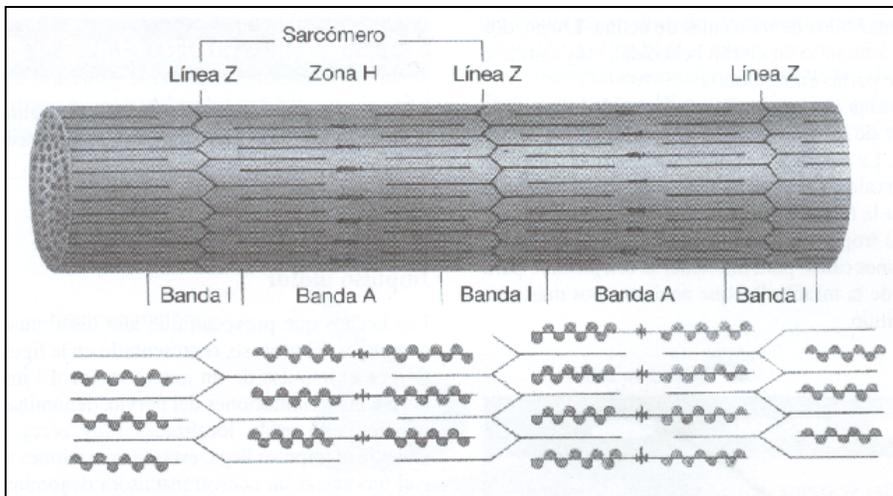


Figura 2.4 La unidad funcional básica de una miofibrilla es el sarcómero, que contiene una estructura especializada de actina y de filamentos de miosina.

Filamentos de miosina. Aunque hemos dicho que cada miofibrilla contiene aproximadamente 3.000 filamentos de actina y 1.500 filamentos de miosina, estos números son engañosos. Alrededor de dos tercios de las proteínas de los músculos esqueléticos son miosina. Recordemos que los filamentos de miosina son

gruesos. Cada uno de ellos está formado, normalmente, por una 200 moléculas de miosina alineadas juntas de punta a punta.

Cada molécula de miosina se compone de dos hilos de proteínas juntos enrollados (ver figura 2.5). Uno de los extremos de cada hilo está doblado formando una cabeza globular, denominada cabeza de miosina. Cada filamento contiene varias de estas cabezas, que sobresalen del filamento de miosina para formar puentes cruzados que interactúan durante la acción muscular, con puntos activos especializados sobre los filamentos de actina.

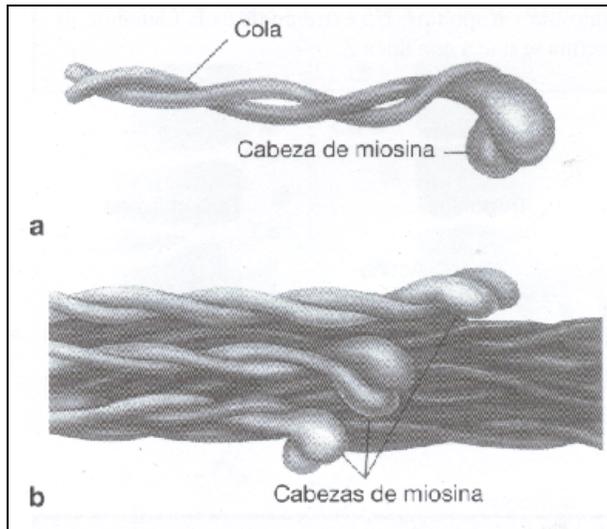


Figura 2.5 (a) Una molécula de miosina y (b) un filamento de miosina.

Filamento de actina. Cada filamento de actina tiene uno de los extremos insertados en una línea Z, con el extremo contrario extendiéndose hacia el centro del sarcómero, tendido en el espacio sito entre los filamentos de miosina. Cada filamento de actina contiene un punto activo al que puede adherirse la cabeza de miosina.

Cada filamento delgado, aunque los refiramos a él como un filamento de actina, se compone en realidad de tres tipos diferentes de moléculas:

1. Actina.
2. Tropomiosina.
3. Troponina.

La **actina** forma la columna vertebral del filamento. Individualmente, las moléculas de actina son globulares y se unen entre sí para formar hilos de moléculas de actina. Luego, dos hilos se enrollan formando un diseño helicoidal, muy similar a dos filamentos de perlas entrelazados.

La **tropomiosina** es una proteína en forma de tubo que se enrolla alrededor de hilos de actina, encajando en las hendiduras entre ellos. La **troponina** es una proteína más compleja que se une a intervalos regulares a los dos hilos de actina y a la tropomiosina. En la figura 2.6 se muestra esta disposición. La tropomiosina y la troponina actúan juntas de un modo intrincados junto con iones calcio para mantener la relajación o para iniciar la acción de la miofibrilla, que analizaremos más adelante en este capítulo.

RESUMEN

1. Las miofibrillas se componen de sarcómeros las unidades funcionales más pequeñas de un músculo.
2. Un sarcómero se compone de filamentos de dos proteínas que son responsables de la contracción muscular.
3. La miosina es un filamento grueso, que se dobla formando una cabeza globular de un extremo.
4. Un filamento de actina se compone de actina, tropomiosina y troponina. Un extremo de cada filamento de actina se une a una línea Z.

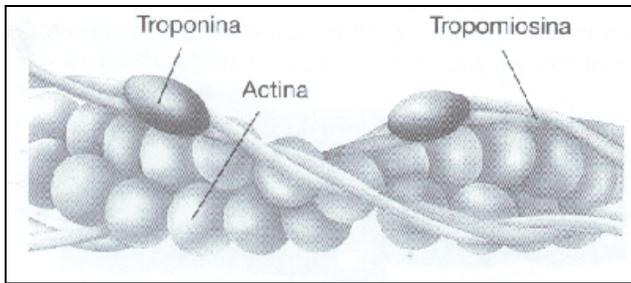


Figura 2.6 Un filamento de actina compuesto por moléculas de actina, tropomiosina y troponina.

ACCIÓN DE LAS FIBRAS MUSCULARES

Cada fibra muscular está inervada por un solo nervio motor, finalizando cerca de la mitad de la fibra muscular. El único nervio motor y todas las fibras musculares a las que inerva reciben colectivamente la denominación de **unidad motora**. Esta sinapsis entre un nervio motor y una fibra muscular se denomina unión neuromuscular. Es el lugar en que se produce la unión entre los sistemas nerviosos y muscular. Examinaremos este proceso.

PUNTO CLAVE: Una unidad motora consta de una sola neurona motora y de todas las fibras musculares a las que abastece.

Impulso motor

Los hechos que provocan que una fibra muscular actúe son complejos. El proceso, representado en la figura 2.7, es iniciado por el impulso de un nervio motor. El impulso nervioso llega a las terminaciones del nervio, denominadas axones terminales, que están localizadas muy cerca del sarcolema. Cuando el impulso llega, estas terminaciones nerviosas segregan una sustancia neurotransmisoras denominada acetilcolina que se une a los receptores en el sarcolema (ver figura 2.7 a). Si se une una cantidad suficiente de acetilcolina a los receptores, se transmitirá una carga eléctrica a todo lo largo de la fibra muscular. A esto se lo conoce como disparar o generar un potencial de acción. Un potencial de acción debe generarse en la célula muscular antes de que ésta pueda actuar. En el capítulo 3 se analizan de forma más completa estos hechos nerviosos.

Función del calcio

Además de despolarizar la membrana de la fibra, el impulso eléctrico viaja a través de la estructura de túbulos de la fibra (túbulos T y retículo sarcoplasmático) hacia el interior de la célula. La llegada de una carga eléctrica hace que el retículo sarcoplasmático libere grandes cantidades de iones calcio almacenados en el sarcoplasma (ver figura 2.7 b).

En estado de reposo, se cree que las moléculas de tropomiosina se hallan encima de los puntos activos de los filamentos de actina, impidiendo la unión de las cabezas de miosinas. Una vez los iones calcio son liberados del retículo sarcoplasmático, se unen con la troponina en los filamentos de actina. Se cree que entonces la troponina, con su fuerte afinidad por los iones de calcio, inicia el proceso de acción levantando las moléculas de tropomiosinas de los lugares activos de los filamentos de actina. Esto se muestra en la figura 2.7c. Puesto que la tropomiosina normalmente oculta los puntos activos, bloquea la atracción entre el puente cruzado de miosina y el filamento de actina. No obstante, una vez la tropomiosina ha sido separada de los lugares activos mediante la troponina y el calcio, las cabezas de miosinas pueden unirse a los puntos activos de los filamentos de actina.

Teoría del filamento deslizando.

¿Cómo se acortan las fibras musculares? La explicación de este fenómeno se denomina teoría del **filamento deslizando**. Cuando un **puente cruzado de miosina** se une a un filamento de actina, los dos filamentos se deslizan uno a lo largo del otro. Se cree que las cabezas de miosinas y los puentes cruzados sufren un cambio de conformación en el instante que se unen a los puntos activos de los filamentos de actina. El brazo del puente cruzado y la cabeza de miosina experimentan una fuerte atracción intermolecular que hace que la cabeza se incline hacia el brazo y que tire de los filamentos de actina y miosina en direcciones opuestas (ver figura 2.8). Esta inclinación de la cabeza se denomina **ataque de fuerza**.

Inmediatamente después de que la cabeza de miosina se incline, se separa del punto activo, gira nuevamente hacia su posición original y se une a un nuevo punto activo un poco más adelante del filamento de actina. Uniones repetidas y ataques de fuerza hacen que los filamentos se deslicen uno a lo largo de los otros dando lugar a la aparición del nombre **teoría del filamento deslizante**. Este proceso continúa hasta que los extremos de los filamentos de miosina llegan a las líneas Z. Durante este deslizamiento (contracción), los filamentos de actina son llevados uno más cerca de los otros y sobresalen hacia la zona H, sobreponiéndose en última instancia. Cuando esto sucede, la zona H deja de ser visible.

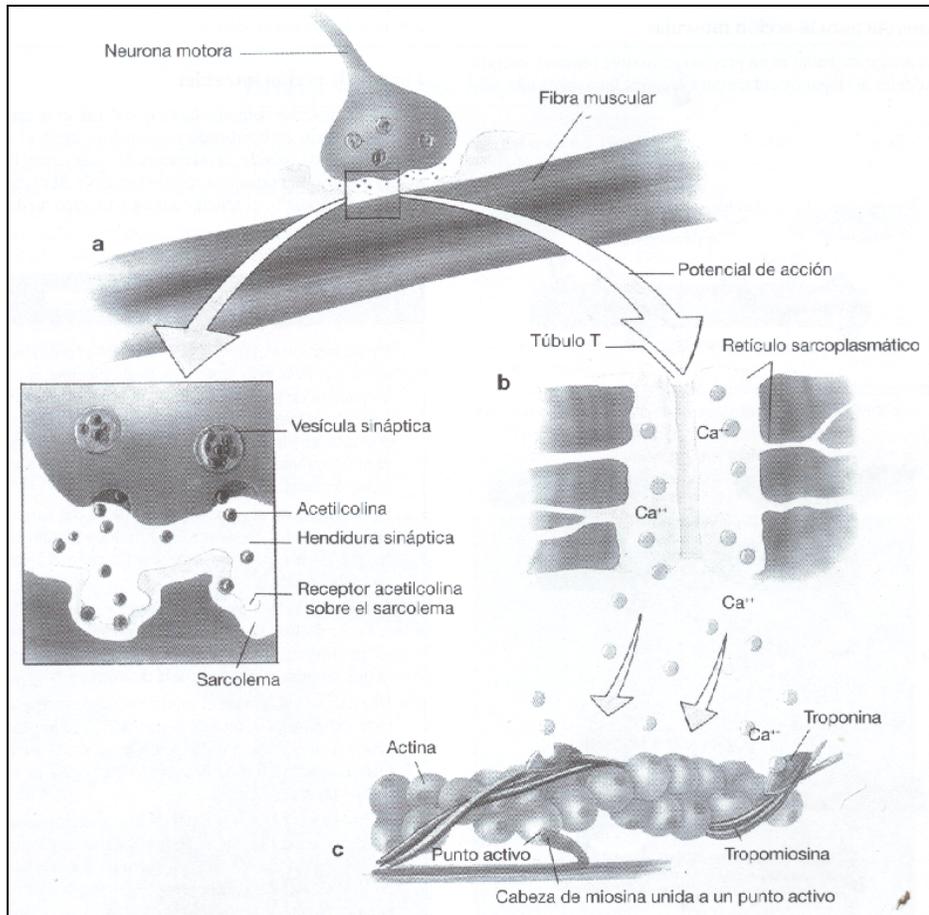


Figura 2.7 La secuencia de acontecimiento que conduce a una acción muscular. (a) Una neurona motora libera acetilcolina, que se fija a receptores sobre el sarcolema. Si se une suficiente acetilcolina, se genera un potencial de acción en la fibra muscular. (b) El potencial de acción activa la liberación de Ca^{++} desde el retículo sarcoplasmático hacia el sarcoplasma. (c) El Ca^{++} se une con troponina sobre el filamento de actina, y la troponina expulsa la tropomiosina de los lugares activos, permitiendo que las cabezas de miosina se adhieran al filamento de actina.

Energía para la acción muscular.

La acción muscular es un proceso activo que requiere energía. Además del lugar de enlace para la actina, una cabeza de miosina contiene un punto de enlace para el ATP (trifosfato de adenosina). La molécula de miosina debe enlazarse con el ATP para que la acción muscular se produzca ya que el ATP proporciona la energía necesaria.

La enzima ATPasa, que está localizada sobre la cabeza de miosina, divide el ATP para dar ADP (difosfato de adenosina), Pi y energía. La energía liberada en esta descomposición del ATP se usa para unir la cabeza de miosina con el filamento de actina. Por lo tanto, el ATP es la fuente química de energía para la acción muscular. En el capítulo 5 analizaremos esto con mucho mayor detalle.

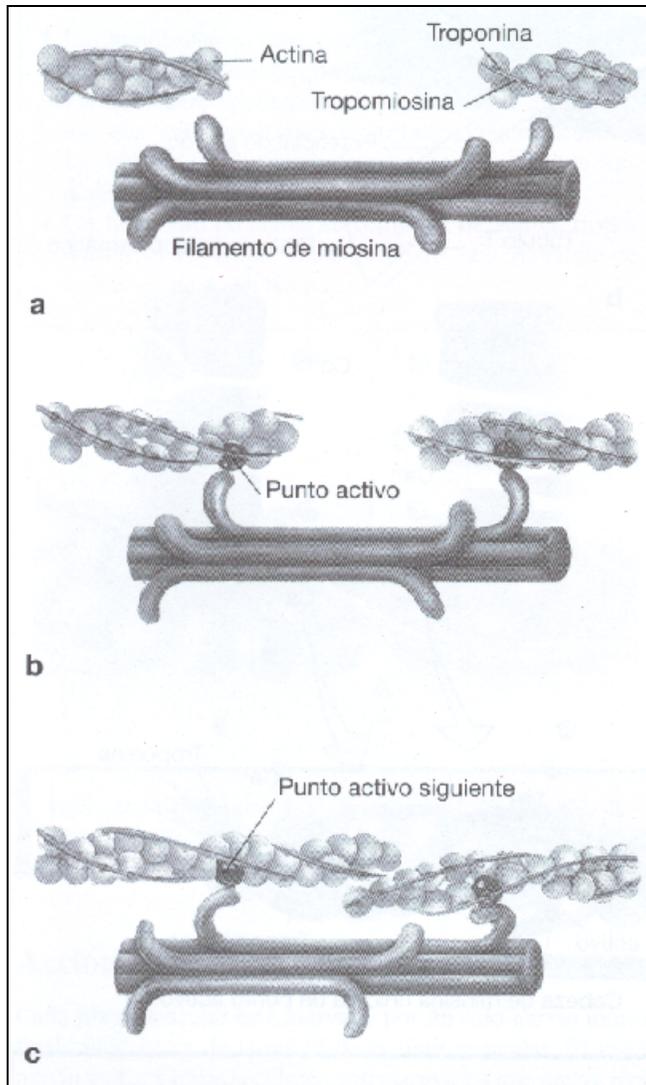


Figura 2.8 Un fibra muscular (a) relajada, (b) contrayéndose y (c) completamente contraída, ilustrando la acción de trinquete responsable del deslizamiento de la actina y de los filamentos de miosina.

Final de la acción muscular.

La acción muscular continúa hasta que el calcio se agota. Entonces el calcio es bombeado nuevamente hacia el retículo sarcoplasmático, donde es almacenado hasta que llega un nuevo impulso nervioso a la membrana de la fibra muscular. El calcio es devuelto al retículo sarcoplasmático mediante un sistema activo de bombeo de calcio. Este es otro proceso demandante de energía tanto para las fases de acción como para las de relajación.

Cuando el calcio es eliminado, la troponina y la tropomiosina son desactivadas. Esto bloquea el enlace de los puentes cruzados de miosina y de los filamentos de actina e interrumpe la utilización de ATP en consecuencia, los filamentos de miosina y de actina vuelven a su estado original relajado.

RESUMEN

1. La acción muscular se inicia con impulso nervioso motor. El nervio motor libera acetilcolina, que abre las puertas de los iones en las membranas de las células musculares, permitiendo que el sodio entre en la célula muscular (despolarización). Si la célula se despolariza suficientemente, se dispara un potencial de acción y la acción muscular se produce.

2. El potencial de acción viaja a lo largo del sarcolema, después a través del sistema de túbulos y finalmente hace que el calcio almacenado sea liberado del retículo sarcoplásmico.
3. El calcio se enlaza con la troponina, y luego ésta levanta las moléculas de tropomiosina de los puntos activos sobre el filamento de actina, abriendo estos puntos para que se enlacen con la cabeza de miosina.
4. Una vez se enlaza con el punto activo de actina, la cabeza de miosina se inclina, arrastrando el filamento de actina de modo que los dos se deslicen uno a través del otro. La inclinación de la cabeza de miosina es el ataque de fuerza.
5. La energía es requerida antes de que la acción muscular pueda ocurrir. La cabeza de miosina se enlaza con el ATP, y el ATP se divide en ADP y Pi, liberando energía para alimentar la contracción.
6. La acción muscular finaliza cuando el calcio es bombeado nuevamente desde el sarcoplasma al retículo sarcoplásmico para almacenarlo. Este proceso, que conduce a la relajación, requiere también energía aportada por el ATP.

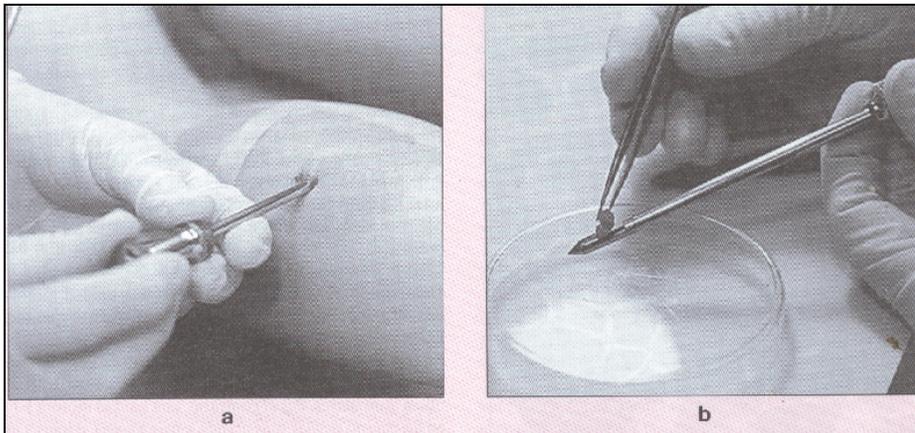


Figura 2.9 (a) Una aguja de biopsia muscular es insertada en el vientre del músculo para extraer una muestra del tejido muscular; (b) la muestra de músculo que se extrae puede luego estudiarse.

MÚSCULOS ESQUELÉTICOS Y EJERCICIO.

Ahora que hemos revisado la estructura general de los músculos y los procesos mediante los que actúan las miofibrillas, estamos más preparados para contemplar más específicamente el funcionamiento muscular durante el ejercicio. Nuestra resistencia y velocidad dependen en gran medida de la capacidad de nuestros músculos para producir energía y fuerza. Veamos cómo desempeñan los músculos esta tarea.

Fibras musculares de contracción lenta y de contracción rápida.

No todas las fibras musculares son iguales. Un mismo músculo esquelético contiene dos tipos principales de fibras: de contracción lenta (ST, del inglés *fast-twitch*) y de contracción rápida (FT, del inglés *fast-twitch*). Las **fibras de contracción lenta** necesitan aproximadamente 110 ms para alcanzar su máxima tensión cuando son estimuladas. Las **fibras de contracción rápida**, por otro lado, pueden alcanzar su máxima tensión en unos 50 ms.

Aunque sólo se ha identificado un tipo de fibra ST, las fibras FT pueden clasificarse con mayor detalle. Los dos tipos más importantes de fibras FT son las de contracción rápida de tipo a (FTa) y las de contracción de tipo b (FTb). La figura 2.10 es una micrografía de un músculo humano en la que secciones finamente cortadas (10 µm) de una muestra muscular se han teñido químicamente para diferenciar los tipos de fibra. Las fibras ST están teñidas en negro, las fibras FTa no están teñidas, y las fibras FTb están teñidas en gris. Aunque en esta figura no se aprecia se ha identificado un tercer subtipo de fibra de contracción rápida: las de tipo c (FTc).

Las diferencias entre las fibras FTa, FTb y FTc no se entienden del todo, pero se cree que las fibras FTa son las que se movilizan con más frecuencia. Únicamente las fibras ST se movilizan con mayor frecuencia que las fibras FTa. Las fibras FTc son las que se usan con menos frecuencias. Por término medio, la mayoría de los músculos están compuestos por aproximadamente un 50 % de fibras ST y un 25 % de fibras FTa. El

restante 25% son principalmente fibras FTb, formando las fibras FTc solamente del 1% al 3% del músculo. Puesto que los conocimientos sobre ellas son limitados, no vamos a seguir discutiendo sobre las fibras FTc. El porcentaje exacto de estos tipos de fibras en diversos tipos de músculos varía enormemente, por lo que las fibras aquí citadas son promedios.

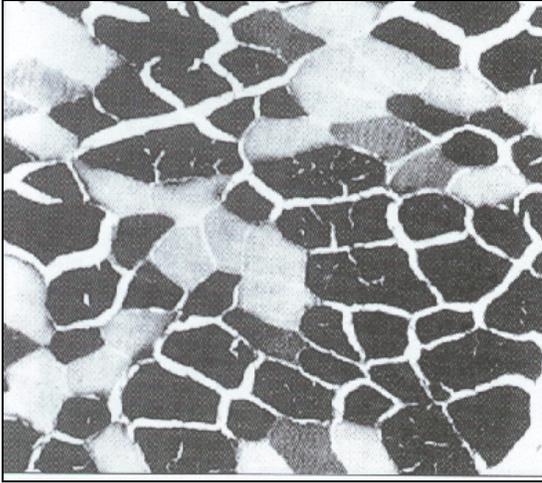


Figura 2.10 Una fotomicrografía mostrando fibras musculares de contracción lenta (ST) y de contracción rápida (FT).

Características de las fibras ST y FT.

Sabiendo que existen diferentes tipos de fibras musculares necesitamos conocer su significado. ¿Qué funciones desempeñan en la actividad física?. Para contestar a esto, examinemos primero cómo se diferencian los tipos de fibras.

ATPasa. Los tipos de fibras ST y FT derivan sus nombres de la diferencia de su velocidad de acción, que es el resultado principalmente de diferentes formas de miosina ATPasa. Recordemos que la miosina ATPasa es la enzima que divide el ATP para liberar energía a fin de producir la contracción o de permitir la relajación. Las fibras ST tienen una forma lenta de miosina ATPasa, mientras que las fibras FT tienen una forma rápida. En respuesta a la estimulación nerviosa, el ATP se divide más rápidamente en fibras FT que en fibras ST. En consecuencia, las fibras FT disponen de energía para la contracción más rápidamente que las fibras ST.

El sistema usado para clasificar las fibras musculares emplea un tinte químico aplicado a un corte fino de tejido. Esta técnica de teñido actúa sobre la ATPasa se tiñen de diferentes formas, tal como vemos en la figura 2.10. Esta técnica hace que parezca que cada fibra muscular tenga un solo tipo de ATPasa, pero las fibras pueden tener una mezcla de tipos. Algunas tienen un predominio de ST-ATPasa, pero otras tienen principalmente FT-ATPasa. Su apariencia en una preparación teñida para el microscopio debe contemplarse como un continuo, más que como tipos absolutamente distintos.

La tabla 2.1 resume las características de los distintos tipos de fibras musculares: incluye también nombres alternativos que se usan en otros sistemas de clasificación para referirse a los tipos de fibras musculares.

Retículo sarcoplasmático. Las fibras FT tienen un retículo sarcoplasmático mucho más desarrollado que las fibras ST. Así, las fibras FT son más propensas a liberar calcio en las células musculares cuando se las estimulan. Se cree que esta capacidad contribuye a la mayor velocidad de acción de las fibras FT.

Unidades motoras. Recordemos que una unidad motora es una sola neurona motora y las fibras musculares que inerva. La neurona parece determinar que las fibras sean ST o FT. En una unidad motora ST, la neurona motora tiene un pequeño cuerpo celular e inerva una agrupación de entre 10 y 180 fibras musculares. Por el contrario, una unidad motora FT tiene un cuerpo celular más grande y más axones, e inerva entre 300 y 800 fibras musculares.

Una disposición tal de las unidades motoras significa que, cuando una sola neurona motora ST estimula sus fibras, se contraen muchas menos fibras musculares que cuando una única neurona motora FT estimula las suyas. En consecuencia, las fibras motoras FT alcanzan su punto máximo de tensión más deprisa y generan

relativamente más fuerza que las fibras ST. No obstante, la fuerza de las fibras ST y FT individuales no es espectacularmente distintas.

Tabla 2.1 Clasificación de los tipos de fibra muscular.

CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS			
Sistema 1	Contracción lenta	Contracción rápida a	Contracción rápida b
Sistema 2	Tipo I	Tipo IIa	Tipo IIb
Sistema 3	OL	GOR	G
<u>Característica</u>			
Capacidad oxidativa	Alta	Moderadamente alta	Baja
Capacidad glucolítica	Baja	Alta	La más alta
Velocidad contráctil	Lenta	Rápida	Rápida
Resistencia a la fatiga	Alta	Moderadamente alta	Baja
Fuerza de la unidad motora	Baja	Alta	Alta

Nota. En este texto usamos el sistema 1 para clasificar los tipos de fibras musculares. Los otros sistemas se usan con frecuencia. El sistema 2 clasifica las fibras ST como tipo I y las fibras FT como tipo IIa y tipo IIb. El sistema 3 clasifica los tipos de fibras basándose en la velocidad de contracción de las fibras y en el principal modo de producción de energía. Las fibras ST reciben la denominación de fibras FTa son fibras GOR (glucolíticas oxidativas rápida) y las FTb son consideradas como fibras G (glucolíticas rápidas).

PUNTO CLAVE: La diferencia en el desarrollo de la fuerza entre las unidades motoras FT y ST se debe al número de fibras musculares por unidad motora, no a la fuerza generada por cada fibra.

Distribución de los tipos de fibras

Tal como se ha mencionado antes; los porcentajes de fibras ST y FT no son los mismos en todos los músculos del cuerpo. Generalmente, los músculos de las extremidades superiores y de las inferiores de una persona tienen composiciones de fibras similares. Diversos estudios han demostrado que las personas con predominio de fibras ST en los músculos de sus piernas tendrán probablemente también un alto porcentaje de fibras ST en los músculos de sus brazos. Para las fibras FT existe una relación similar. Hay algunas excepciones, no obstante. El músculo sóleo (en la pantorrilla, por debajo de los gemelos), por ejemplo, está compuesto casi enteramente por fibras ST.

Tipos de fibras y ejercicio

Hemos visto las distintas maneras en que difieren las fibras ST y FT. Basándose en estas diferencias, podemos esperar que estos tipos de fibras tengan también diferentes funciones cuando se está físicamente activo. Efectivamente, éste es el caso.

Fibras ST. En general, las fibras musculares de contracción lenta tiene una elevada resistencia aeróbica. Definamos este término. Aeróbico significa “en presencia de oxígeno”, por lo que la oxigenación es un proceso aeróbico. Las fibras ST son muy eficientes en la producción de ATP a partir de la oxigenación de los hidratos de carbono y de las grasas.

Recordemos que la ATP se necesita para producir la energía necesaria para la acción y la relajación muscular. Mientras dura la oxidación, las fibras ST continúan produciendo ATP, permitiendo que las fibras sigan activas. La capacidad para mantener la actividad muscular durante un período de tiempo prolongado es conocida como resistencia muscular, por lo que las fibras ST tienen una elevada resistencia aeróbica. Por ello, se movilizan con más frecuencia durante las pruebas de resistencia de baja intensidad, tales como las carreras de maratón o al nadar por la calle de una piscina.

Fibras FT. Por otro lado, las fibras musculares de contracción rápida tienen una relativamente mala resistencia aeróbica. Están mejor adaptadas para rendir anaeróticamente (sin oxígeno) que las fibras ST. Esto significa que su ATP se forma a través de las vías anaeróbicas, no mediante la oxigenación. (Estas vías se analizarán en detalle en el capítulo 5).

Las unidades motoras FTa generan considerablemente más fuerza que las unidades motoras ST, pero se fatigan fácilmente debido a su limitada capacidad de resistencia. Así, las fibras FTa parecen que se usan

principalmente durante las pruebas breves de resistencia de alta intensidad tales como la carrera de una milla (1.609 m) o los 400 m de natación.

Aunque la trascendencia de las fibras FTb no se conoce del todo, aparentemente no son activas con facilidad por el sistema nervioso. Por ello se usan más bien con poca frecuencia en las actividades normales de baja intensidad, pero se emplean predominantemente en las pruebas altamente explosivas tales como las carreras de 100m y las pruebas de natación de 50m. En la tabla 2.2 se resumen las características de los distintos tipos de fibras.

Determinación del tipo de fibra.

Las características de las fibras musculares ST y FT parecen quedar determinadas en una fase temprana de la vida, quizás antes de transcurrido los primeros años. Estudios con mellizos han mostrado que la composición de las fibras musculares viene determinada genéticamente, variando poco desde la niñez hasta la edad madura. Estos estudios revelan que los gemelos tienen composiciones de fibras musculares casi idénticas, mientras que los mellizos difieren en sus perfiles de fibra. Los genes que heredamos de nuestros padres determinan que neuronas motoras inervan nuestras fibras musculares individuales. Después de haberse establecido la inervación, nuestras fibras musculares se diferencian (se especializan) según el tipo de neurona que las estimula.

Pero esto puede cambiar con el tiempo. A medida que envejecemos, nuestros músculos tienden a perder fibras FT, lo cual incrementa el porcentaje de fibras ST.

Tabla 2.2 Características estructurales y funcionales de los tipos de fibras musculares.

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE FIBRA		
	ST	FTa	FTb
Fibras por neurona motora	10-180	300-800	300-800
Tamaño de la neurona motora	Pequeña	Grande	Grande
Velocidad de conducción del nervio	Lenta	Rápida	Rápida
Velocidad de contracción (m/s)	50	110	110
Tipo de miosina ATPasa	Lenta	Rápida	rápida
Desarrollo del retículo sarcoplasmático	Bajo	Alto	Alto
Fuerza de la unidad motora	Baja	Alta	Alta
Capacidad aeróbica (oxidativa)	Alta	Moderada	Baja
Capacidad anaeróbica (glucolítica)	Baja	Alta	Alta

RESUMEN

1. La mayoría de los músculos esqueléticos contienen tanto fibras ST como fibras FT.
2. Los diferentes tipos de fibras tienen diferentes ATPasas. La ATPasa en las fibras FT actúa con mayor rapidez, proporcionando energía para la acción muscular.
3. Las fibras FT tienen un retículo sarcoplasmático mucho más desarrollado, mejorando el aporte de calcio necesario para la acción muscular.
4. Las neuronas motoras que abastecen a las unidades motoras FT son mayores y aportan más fibras de lo que hacen las neuronas para las unidades motoras ST. Las unidades motoras FT tienen más fibras para contraer y pueden producir más fuerza que las unidades motoras ST.
5. Las proporciones de fibras ST y FT en los músculos de los brazos y las piernas de un individuo suelen ser bastante similares.
6. Las fibras ST tienen una alta resistencia aeróbica y son muy adecuadas para las actividades de resistencia de baja intensidad.
7. Las fibras FT son mejores para las actividades anaeróbicas. Las fibras FTa son bien utilizadas en las series explosivas. Las fibras FTb no se comprenden bien, pero sabe que no se movilizan fácilmente para que actúen.

MOVILIZACIÓN DE FIBRAS MUSCULARES.

Cuando una neurona motora estimula una fibra muscular, se requiere una intensidad mínima de estimulación, denominada umbral, para obtener una respuesta. Si la estimulación es inferior a su umbral, no se produce ninguna acción muscular. Pero con cualquier estimulación igual o superior al umbral, se produce una acción máxima en la fibra muscular. Esto se conoce como la ley del todo o nada. Puesto que todas las fibras musculares de una misma unidad motora reciben la misma estimulación nerviosa, la totalidad de las fibras de la unidad motora actúan al máximo siempre que se satisface el umbral. Así, la unidad motora exhibe también una ley del todo o nada.

Cuando se activan más fibras musculares, se produce más fuerza. Cuando se necesita poca fuerza, sólo son activadas unas pocas fibras musculares. Recordemos de nuestro análisis anterior que las unidades motoras FT contienen más fibras musculares que las unidades motoras ST. La acción muscular esquelética implica una movilización selectiva de fibras musculares ST o FT, dependiendo de las demandas de la actividad que se ejecuta. En los primeros años setenta, Gollnick y cols, demostraron que, efectivamente, esta movilización selectiva es determinada no por la velocidad de la acción, sino por el nivel de fuerza exigido al músculo.

La figura 2.11 ilustra la relación entre el desarrollo de la fuerza y la movilización de las fibras ST, FTa FTb. Durante los ejercicios de baja intensidad, tales como andar, la mayor parte de la fuerza muscular es generada por fibras ST. Cuando las demandas de tensión muscular aumentan a intensidades de ejercicio más altas, tales como *jogging*, las fibras FTa se suman a la fuerza de trabajo. Por último, en pruebas en las que se necesitaba fuerza máxima, tales como las carreras de *sprint*, las fibras FTb también se activan.

No obstante, incluso durante la realización de esfuerzos máximos, el sistema nervioso no moviliza el 100% de las fibras disponibles. A pesar de nuestro deseo por producir más fuerza, solamente una fracción de nuestras fibras musculares son estimuladas en un momento específico. Esto ayuda a prevenir lesiones en nuestros músculos y tendones. Si pudiésemos contraer todas las fibras de nuestros músculos al mismo tiempo, la fuerza generada desgarraría por igual los músculos o sus tendones.

Durante los encuentros que duran varias horas, hay que hacer ejercicio a un ritmo submáximo, con lo que la tensión de nuestros músculos será relativamente baja. Como resultado, el sistema nervioso tiende a movilizar las fibras musculares mejor adaptadas para las actividades de resistencia: las fibras ST y algunas fibras FTa. Conforme prosigue el ejercicio, estas fibras agotan su principal fuente de combustible (el glucógeno) y el sistema nervioso debe movilizar más fibras FTa para mantener la tensión muscular. Por último, cuando las fibras ST y FTa quedan agotadas, se recurre a las fibras FTb para continuar el esfuerzo por mantener el ejercicio. Esto puede explicar por qué la fatiga parece llegar por etapas en pruebas como las carreras de maratón, que duran 42.139 km. Probablemente, también explica por qué mantener un determinado ritmo al final de la prueba exige un gran esfuerzo consciente. Este esfuerzo consciente da como resultado la activación de las fibras musculares que no son fácilmente movilizables. Tal información es de importancia práctica para comprender las demandas específicas del entrenamiento y del rendimiento. En los capítulos 4 y 7 estudiaremos esto con mayor profundidad.

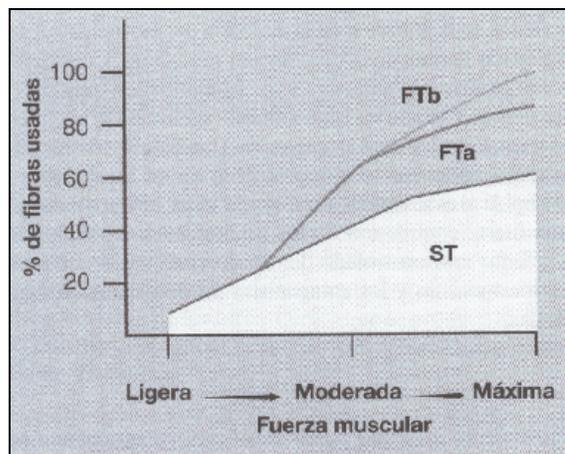


Figura 2.11 Movilización en forma de rampa de las fibras musculares de contracción rápida y de contracción lenta.

RESUMEN

1. El umbral. Cuando esto sucede, todas las fibras musculares de la unidad motora actúan al máximo. Si no se llega al umbral de estimulación, ninguna de las fibras de esta unidad actúa.
2. Se produce más fuerza activando más unidades motoras y, por lo tanto, más fibras musculares.
3. En las actividades de baja intensidad, la mayor parte de la fuerza muscular es generada por las fibras ST. Cuando la resistencia aumenta, se moviliza fibras FTa, y si necesita fuerza máxima, se activan las fibras FTb. Durante las pruebas de larga duración se sigue el mismo modelo de movilización.

TIPO DE FIBRA Y ÉXITO DEPORTIVO.

El conocimiento de la composición y el uso de las fibras musculares sugiere que los deportistas que tienen un alto porcentaje de fibras ST pueden tener una cierta ventaja en las pruebas prolongadas de resistencia, mientras que quienes tienen un predominio de fibras FT pueden estar mejor dotados para las actividades breves y explosivas. ¿Es posible que las proporciones de los diferentes tipos de fibras musculares de un deportista determinen en éxito deportivo?.

La tabla 2.3 muestra la composición de las fibras musculares de los deportistas con éxito en una diversidad de pruebas deportivas. Compárense los corredores. Tal como hemos anticipado, los músculos de las extremidades inferiores de los corredores de fondo, que dependen de su capacidad de resistencia, tienen un predominio de fibras ST. Estudios de corredores de fondo masculino y femenino de elite revelaron que, en muchos, los músculos gemelos (pantorrilla) presentan más del 90% de fibra ST. Asimismo, aunque la sección transversal de fibras musculares varía notablemente entre los corredores de fondo de elite, las fibras musculares ST en los músculos de sus extremidades inferiores ocupan en promedio un 22% más de sección transversal que las fibras FT.

Por el contrario, los músculos gemelos se componen principalmente de fibras FT en los *sprinters*, que dependen de la velocidad y de la fuerza. Aunque los nadadores tienden a tener porcentajes más elevados de fibras ST (del 60% al 65%) en sus músculos que los sujetos no entrenados (del 45% al 55%), las diferencias en los tipos de fibras entre los nadadores buenos y de elite no son aparentes.

La composición en cuanto a fibras de los músculos de los corredores de fondo y de los *sprinter* es notablemente distinta. No obstante, puede ser un poco arriesgado pensar que podemos seleccionar a corredores de fondo y *sprinter* campeones basándonos únicamente en el tipo de fibra muscular predominante. Otros factores, tales como la función cardiovascular y el tamaño muscular, también contribuyen al éxito en estas pruebas de resistencia, velocidad y fuerza. Así, la composición en fibras por sí sola no es un modo fiable de pronóstico del éxito deportivo.

Tabla 2.3 Porcentajes de sección transversal de fibras musculares de contracción lenta (ST) y de contracción rápida (FT) en músculos escogidos de deportistas hombres (H) y mujeres (M).

DEPORTISTA	SEXO	MÚSCULO	%ST	%FT	Sección transversal	
					ST	FT
Corredores de <i>sprint</i>	H	Gemelo	24	76	5,878	6,034
	M	Gemelo	27	73	3,752	3,930
Corredores de fondo	H	Gemelo	79	21	8,342	6,485
	M	Gemelo	69	31	4,441	4,128
Ciclistas	H	Vasto externo	57	43	6,333	6,116
	M	Vasto externo	51	49	5,487	5,216
Nadadores	H	Deltoides posterior	67	33	-	-
Levantadores de peso	H	Gemelo	44	56	5,060	8,910
	H	Deltoides	53	47	5,010	8,450
Trideportistas	H	Deltoides posterior	60	40	-	-
	H	Vasto externo	63	37	-	-
	H	Gemelo	59	41	-	-
Piragüistas	H	Deltoides posterior	71	29	4,920	7,040
Lanzadores de peso	H	Gemelo	38	62	6,367	6,441
No deportistas	H	Vasto externo	47	53	4,722	4,709
	M	Gemelo	52	48	3,501	3,141

UTILIZACIÓN DE LOS MÚSCULOS

Hemos examinado los diferentes tipos de fibras musculares. Entendemos que, cuando se estimula, todas las fibras de una unidad motora actúan al mismo tiempo y que distintos tipo de fibras se van movilizando por fases, dependiendo de la naturaleza de la actividad. Ahora podemos volver al nivel general, centrando nuestra atención en cómo funcionan los músculos para producir movimiento.

Los más de 215 pares de músculos esqueléticos del cuerpo varían ampliamente en cuanto a tamaño, forma y utilización. Cada movimiento coordinado requiere la aplicación de la fuerza muscular. Esto se logra mediante:

- los agonistas o movilizadores principales, músculos que son los principales responsables del movimiento;
- los antagonistas músculos que se oponen a los movilizadores principales, y
- los sinergistas, músculos que ayudan a los movilizadores principales.
-

Tal como se ilustra en la figura 2.12, la flexión uniforme del codo requiere el acortamiento de los músculos braquial anterior y bíceps braquial (agonistas) y la relajación del tríceps braquial (antagonista). El músculo supinador largo (sinergista) ayuda al braquial y al bíceps braquial en su flexión de la articulación.

Los agonistas producen la mayor parte de la fuerza necesaria para cualquier movimiento dado. Los músculos actúan sobre los huesos con los que están unidos, tirando de los unos hacia los otros. Los sinergistas facilitan esta acción y a veces intervienen en la afinación de la dirección del movimiento. Los antagonistas desempeñan una función protectora. Consideramos los cuádriceps (anterior) y los isquiotibiales (posterior) de los muslos. Cuando los esquiotibiales (agonistas) se contraen con fuerza, los cuádriceps (antagonistas) también se contraen ligeramente, oponiéndose al movimiento de los isquiotibiales. Esto impide el estiramiento excesivo de los cuádriceps mediante una fuerte contracción de los esquiotibiales y permite un movimiento más controlado del muslo. Esta acción opuesta entre los agonistas y los antagonistas produce también tono muscular.

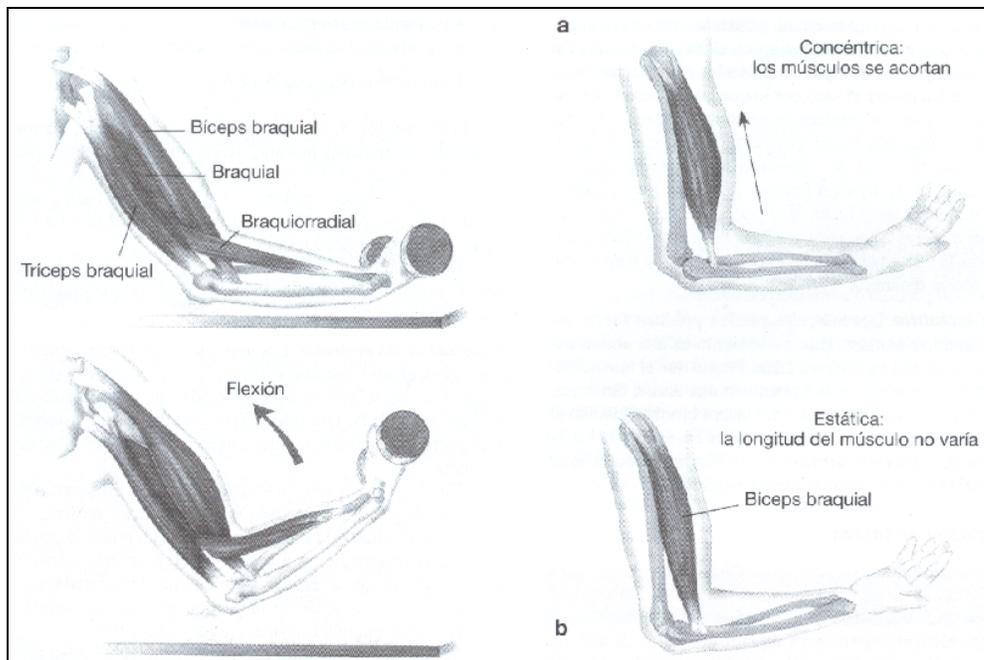


Figura 2.12 Las acciones de los músculos agonistas, antagonistas y sinérgicos durante la flexión el codo.

Tipos de acción muscular.

El movimiento muscular puede clasificarse generalmente en tres tipos de acciones:

1. Concéntricas
2. Estáticas
3. Excéntricas

En muchas actividades, tales como correr y saltar, pueden tener lugar los tres tipos de acciones en la ejecución de un movimiento suave y coordinado. No obstante, para aclarar las cosas, examinaremos cada tipo por separado.

Acción concéntrica. La acción principal de los músculos, el acortamiento, recibe la denominación de **acción concéntrica**. Ésta se muestra en la figura 2.13 a. Estamos muy familiarizados con este tipo de acción. Para comprender el acortamiento muscular, recordemos nuestra discusión anterior sobre el modo en el que los filamentos de actina y de miosina se deslizan los unos a los otros. Puesto que se produce movimiento articular, las acciones concéntricas se consideran como **acciones dinámicas**.

Acción estática. Los músculos pueden actuar también sin moverse. Cuando esto ocurre, el músculo genera fuerza, pero su longitud permanece estática (invariable). Esto recibe la denominación de **acción estática**, vista en la figura 2.13b, ya que el ángulo de articulación no cambia. Ha recibido también la denominación de acción isométrica. Sucede, por ejemplo, cuando intentamos levantar un objeto que es más pesado que la fuerza generada por nuestro músculo, o cuando sostenemos el peso de un objeto manteniéndolo fijo con el codo flexionado. En ambos casos, percibimos que los músculos están tensos pero que no pueden mover el peso por lo que no se acortan. En esta acción, los puentes cruzados de miosina se forma y son reciclados, produciendo fuerza, pero la fuerza externa es demasiado grande para que los filamentos de actina se muevan. Permanecen en su posición normal, de modo que el acortamiento no pueda tener lugar. Si se pueden reclutar suficiente unidades motoras como para producir la necesaria fuerza para superar la resistencia, una acción estática puede convertirse en una acción dinámica.

Acción excéntrica. Los músculos pueden producir fuerzas incluso cuando se alargan. Este movimiento es una **acción excéntrica**, mostrada en la figura 2.13c. Puesto que el movimiento articular se produce, ésta es también una acción dinámica. Un ejemplo de esto es la acción del bíceps braquial cuando el codo se extiende para bajar un gran peso. En este caso, los filamentos de actina son arrastrados en Dirección contraria al centro del sarcómero, esencialmente estirándolo.

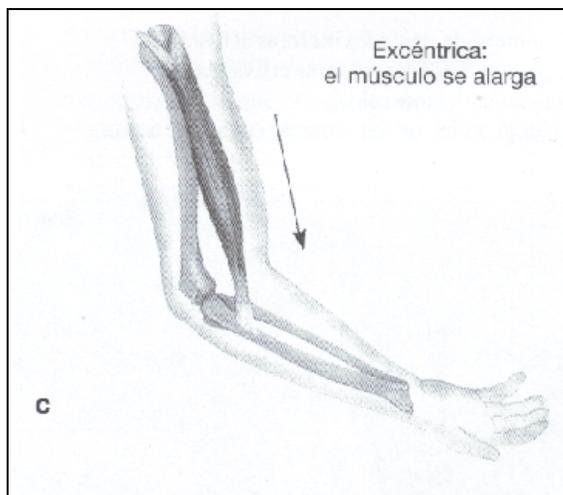


Figura 2.13 (a) Durante las acciones de los músculos concéntricos, los filamentos de actina (delgados) se arrastran haciendo que se aproximen, incrementando su sobreposición con los filamentos de miosina (gruesos). (b) Durante las acciones de los músculos estáticos, los puentes cruzados de miosina se forman y se reciclan, pero la fuerza es demasiado grande para que los filamentos de actina se muevan. (c) Durante las acciones de los músculos excéntricos, los filamentos de actina se separan.

Generación de fuerza.

La fortaleza de nuestros músculos refleja su capacidad para producir fuerza. Si se tiene fuerza para levantar un peso de 135 Kg en prensa de banca, es que los músculos son capaces de producir suficiente fuerza para superar una carga de 135kg Incluso cuando están descargados (no intentando levantar peso), estos músculos deben generar todavía suficiente fuerza como para mover los huesos a los que están unidos. El desarrollo de esta fuerza muscular depende de lo siguiente:

- El número de unidades motoras activadas.
- El tipo e unidades motoras activadas.
- El tamaño del músculo.
- La longitud inicial del músculo cuando se activa.
- El ángulo de la articulación.
- La velocidad de acción del músculo.

Unidades motoras y tamaño muscular. Previamente, hemos analizado las unidades motoras. Recapitulando, diremos que se puede generar más fuerza cuando se activan más unidades motoras. Las unidades motoras FT generan más fuerza que las unidades motoras ST puesto que cada unidad motora FT tiene más fibras musculares que una unidad ST. De manera similar, músculos más grandes, al tener más fibras musculares, pueden producir más fuerza que músculos más pequeños.

Longitud de los músculos. Los músculos y sus tejidos conectivos (aponeurosis y tendones) tienen la propiedad de la elasticidad. Cuando se estiran, esta elasticidad da como resultado energía acumulada. Durante la actividad muscular posterior, esta energía acumulada se libera, aumentando la intensidad de la fuerza.

En el cuerpo intacto, la longitud muscular está restringida por la disposición anatómica y la unión de los músculos a los huesos. Cuando está unido al esqueleto, un músculo con la longitud correspondiente al estado de reposo está normalmente bajo una ligera tensión, ya que se halla moderadamente elongado. Si un músculo fuera liberado de sus uniones, adoptaría una longitud relajada, un tanto más corta. Las mediciones indican que puede generarse fuerza máxima en un músculo cuando éste es elongado primero hasta una longitud aproximadamente un 20% superior a la de reposo. Cuando el músculo está elongado hasta esta longitud la combinación de energía acumulada y la fuerza de acción muscular se optimizan, resultando una mayor producción de fuerza máxima.

Aumentar o reducir la longitud muscular más allá del 20% reduce el desarrollo de la fuerza. Por ejemplo, si el músculo es elongado hasta dos veces su longitud de reposo, la fuerza que produce será casi igual que cero. La energía está todavía acumulada en el músculo debido al estiramiento. De hecho, más estiramiento significa más energía acumulada. Pero hay que considerar otro factor. La fuerza creada por las fibras musculares durante la acción muscular depende del número de puentes cruzados en contacto con los filamentos de actina en cualquier momento dado. Cuanto más están en contacto al mismo tiempo, más fuerte será la acción muscular. Cuando las fibras musculares están sobreelongadas, los filamentos de actina y de miosina quedan más separados entre sí. La menor sobreposición entre estos filamentos da como resultado un menor número de puentes cruzados uniéndose para crear fuerzas.

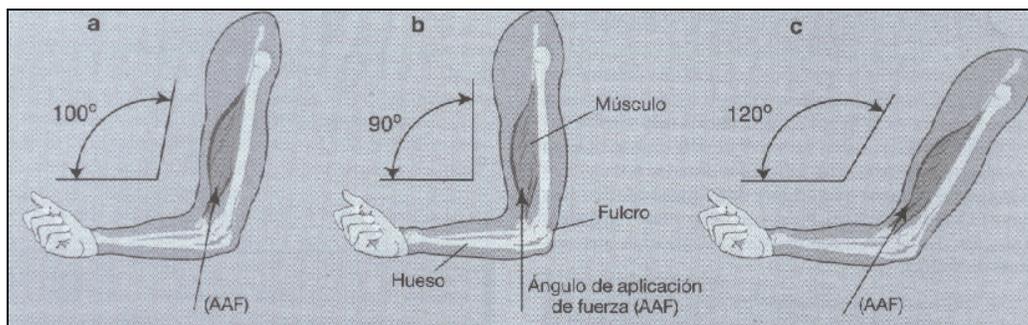


Figura 2.14 Cada articulación tiene un ángulo óptimo de aplicación de fuerza (AAF). (a) Para el bíceps braquial actuando a través del codo, el ángulo óptimo es de 100°. (b) La reducción o (c) el incremento del ángulo de la articulación altera el ángulo de aplicación de fuerza y reduce la fuerza transferida del músculo al hueso.

Ángulo de la articulación. Dado que los músculos ejercen su fuerza a través de las palancas óseas, comprender la disposición física de estas poleas musculares y de estas palancas óseas es crucial para entender el movimiento. Consideremos el bíceps braquial. La unión del tendón al bíceps abarca solamente una décima parte de la distancia comprendida entre el surco del codo y la resistencia pesada que se mantiene en la mano. Así, para sostener un peso de 4,5 kg, el músculo debe ejercer 10 veces (45 kg) esta fuerza.

La fuerza generada en el músculo es transferida al hueso a través de la inserción muscular (tendón). Al igual que con la longitud muscular, un ángulo articular óptimo hará que la intensidad de la fuerza transmitida al hueso sea la máxima. Este ángulo depende de las posiciones relativas de la inserción tendinosa en el hueso y de la carga que se está moviendo. En nuestro ejemplo del bíceps braquial, el mejor ángulo articular para la aplicación de los necesarios 45 kg de fuerza es de 100°. Una mayor o menor reflexión de la articulación del codo alterará el ángulo en que se aplica la fuerza, reduciendo la intensidad de la fuerza transferida al hueso. Esto se ilustra en la figura 2.14.

Velocidad de acción. La capacidad para desarrollar fuerza depende también de la velocidad de la acción muscular. Durante las acciones concéntricas (acortamiento), el desarrollo de la fuerza máxima decrece progresivamente a velocidades más altas. Pensemos cuando intentamos levantar un objeto muy pesado. Tendemos a hacerlo lentamente, maximizando la fuerza que le podemos aplicar. Si lo agarramos y tratamos de elevarlo rápidamente, probablemente no podremos, o incluso puede ser que nos lesionemos. No obstante, con acciones excéntricas (alargamiento), es decir lo contrario. Las acciones excéntricas rápidas permiten la aplicación máxima de la fuerza.

Estas relaciones se representan en la figura 2.15. Las acciones excéntricas se muestran a la izquierda y las concéntricas a la derecha. Obsérvese que las unidades son metros por segundo, por lo que cuanto más alto es el número, más rápida es la acción muscular (moverse 0.8 m en 1 s. es más rápido que moverse solamente 0.2 m en el mismo tiempo).

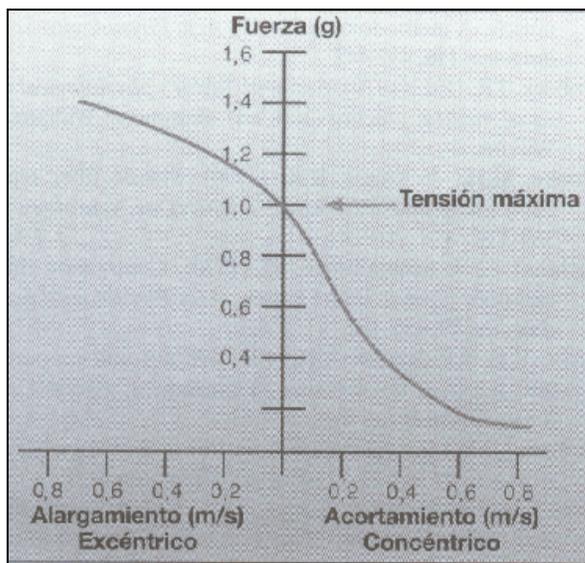


Figura 2.15 Relación entre la longitud del músculo y la producción de fuerza. Adaptado de Astrand y Rodahl.

RESUMEN

- Los músculos que intervienen en un movimiento pueden clasificarse como:
 - Agonistas (movilizadores principales),
 - Antagonistas (oponentes), o
 - Sinergistas (colaboradores).
- Los tres tipos principales de acción muscular son:
 - Concéntrica, en que el músculo se acorta;
 - Estática, en que el músculo actúa, pero en ángulo articular no varía, y
 - Excéntrica, en que el músculo se alarga.

3. La producción de fuerza puede incrementarse movilizando más unidades motoras.
4. La producción de fuerza puede maximizarse si el músculo se elonga un 20% antes de la acción. En este punto, la cantidad de energía acumulada y el número de puentes cruzados actina-miosina unidos son óptimos.
5. Todas las articulaciones tienen un ángulo óptimo en el que los músculos cruzan la función articular para producir fuerza máxima. Éste ángulo varía con la posición relativa de la inserción muscular sobre el hueso y la carga impuesta sobre el músculo.
6. La velocidad de la acción afecta también la cantidad de fuerza producida. Para la acción concéntrica, la fuerza máxima puede lograrse con contracciones más lentas. Cuanto más nos acercamos a la velocidad cero (estática), más fuerza se puede generar. Con las acciones excéntricas, no obstante, los movimientos más rápidos permiten una mayor producción de fuerza.

CONCLUSIÓN

En este capítulo, hemos analizado los componentes de los músculos esqueléticos. Hemos considerado las diferencias en los tipos de fibra y su impacto sobre el rendimiento físico. Hemos aprendido cómo generan fuerzas los músculos y cómo producen movimiento tirando de los huesos. Ahora que entendemos cómo se produce el movimiento, es el *momento* de volver nuestra atención al modo en que se coordina. En el capítulo siguiente, nos centraremos en el control neurológico del movimiento.

REFERENCIA

1. Close, R. (1967). Properties of motor units in fast and slow skeletal muscles of the rat. *Journal of Physiology* (London), **193**, 45-55.
2. Costill, D.L., Daniels, J., Evans, W., Fink, W., Krahenbuhl, G., & Saltin, B. (1976). Skeletal muscle enzyme and fiber composition in male and female track athletes. *Journal of Applied Physiology*, **40**, 149-154.
3. Costill, D.L., Fink, W.J., Flynn, M., & Kirwan, J. (1987). Muscle fiber composition and enzyme activities in elite female distance runners. *International Journal of Sports Medicine*, **8**, 103-106.
4. Costill, D.L., Fink, W.J., & Pollock, M.L. (1976). Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Medicine and Science in Sports*, **8**, 96-100.
5. Gollnick, P.D., & Hodgson, D.R. (1986). The identification of fiber types in skeletal muscle: A continual dilemma. *Exercise and Sports Sciences Reviews*, **14**, 81-104.
6. Gollnick, P.D., Piehl, K., & Saltin, B. (1974). Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibers after exercise of varying intensity and at varying pedal rates. *Journal of Physiology*, **241**, 45-47.