

Ing. Lic. MS. Francisco Guede R.
Curso: Biomecánica I.

1. Introducción.

En los vertebrados en general, y en la especie humana en particular, el movimiento implica desplazamiento de elementos esqueléticos que podemos considerar como elementos pasivos. Sin embargo, este desplazamiento es posible mediante los elementos activos, los cuales son los encargados de transformar la energía química en energía mecánica o fuerza. En los animales pluricelulares, los elementos activos de carácter más universal son los músculos y, en concreto, el músculo esquelético, también llamado músculo voluntario o estriado.

Esta amplia repartición es posible a causa de una gran versatilidad, en el sentido de capacidad para producir movimiento en condiciones muy diversas, ya sea en animales de muy diferentes tamaños, en animales con diferente temperatura, o para aquellos otros que requieren acciones o muy rápidas o extraordinariamente lentas, bien ocasionales o bien rítmicas.

Evidentemente, todo eso no puede conseguirse con una única clase de músculo y a lo largo de la evolución, se han seleccionado diversos tipos. Pero la unidad estructural, responde básicamente a un único patrón, el cual veremos a continuación.

2. Estructura del músculo esquelético.

Constituye cerca del 40% de la masa corporal y contiene elementos contráctiles o activos y elementos inertes o pasivos.

- Músculo estriado o esquelético (40 – 45% P.C)
- Músculo cardíaco
- Músculo liso (10 %)

Cerca del 80% de la masa muscular son fibras musculares o células excitables, capaces de contraerse como respuesta a un estímulo que, fisiológicamente, les llega por vía nerviosa.

Propiedades:

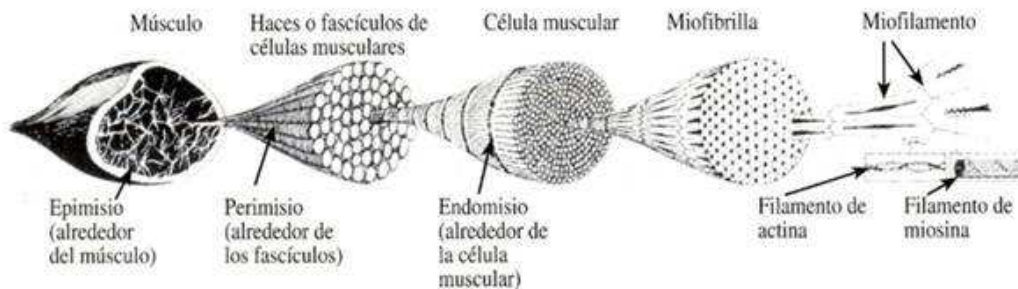
- Irritabilidad (responde a estímulos)
- Contractibilidad (aprox. 50 - 57% de su longitud de reposo)
- Distensibilidad (Posibilidad de elongarlo + de long. reposo)
- Elasticidad (**volver** a su long. reposo)

Composición:

- Alrededor de 430 M. Esq.
- Distribución:
 - 40 – 45 % de la masa corporal
 - 80%: fibras musculares
 - 20% elementos inertes o pasivos.
- Función: Movilidad, fuerza, protección, distribución de cargas, locomoción.
- Altamente Vascularizado e Inervado
- Composición:
 - 75% H₂O
 - 20% proteínas
 - 5% fosfatos y sales minerales

a) Elementos contráctiles.

La estructura microscópica de la fibra muscular proporciona la información necesaria sobre el modo de funcionamiento. Así, el aparato contráctil de cada fibra muscular se subdivide en miofibrillas, formados por haces de filamentos gruesos y finos, y que orientados longitudinalmente están compuestos por proteínas contráctiles .



Dibujos esquemáticos de la organización estructural del músculo. A. Una fascia de tejido conectivo fibroso, el epimisio, envuelve el músculo, el cual se compone de muchos haces, o fascículos. Los fascículos están cubiertos por una vaina de tejido conectivo denso, el perimisio. B. Los fascículos se componen de fibras musculares, que son células largas, cilíndricas y multinucleadas. Entre las fibras musculares individuales se encuentran los vasos sanguíneos capilares. Cada fibra muscular se rodea por un tejido conectivo laxo llamado endomisio, justo debajo del endomisio se dispone el sarcolema, una vaina fina elástica con repliegues que invaginan el interior de la fibra. Cada fibra muscular se compone de numerosas hebras delicadas-miofibrillas, los elementos contráctiles del músculo. C. Las miofibrillas están constituidas de filamentos más pequeños que forman un patrón repetido en forma de banda a lo largo de la longitud de la miofibrilla. Una unidad de este patrón repetido en serie se llama sarcómero. La sarcómero es la unidad funcional del sistema contráctil del músculo. D. El patrón de bandas de la sarcómero se forma por la organización de filamentos finos y gruesos, compuestos por las proteínas miosina y actina, respectivamente. Los filamentos de actina se unen a un extremo pero son libres a lo largo de su longitud para interdigitarse con los filamentos de miosina. Los filamentos gruesos se disponen de forma hexagonal. Una sección transversal a través del área de superposición muestra los filamentos gruesos rodeados por seis filamentos finos a la misma distancia. E. Las moléculas con forma de bastoncillos de cada filamento de miosina se disponen de forma que los tallos largos formen un vínculo con las cabezas, o puentes cruzados, proyectándose desde ellos. Los puentes cruzados apuntan en una dirección a lo largo de la mitad del filamento y en la otra dirección a lo largo de la otra mitad. Sólo una porción de una mitad de un filamento se muestra aquí; los puentes cruzados son un elemento esencial en el mecanismo de la contracción muscular, extendiéndose hacia afuera para interdigitarse con los lugares receptores sobre el filamento de actina. Cada filamento de actina es una doble hélice, que aparece como dos hebras de rosario espiralizándose uno alrededor del otro. Dos proteínas adicionales, la tropomiosina y la troponina, se asocian con la hélice de actina y desempeñan un papel importante en la regulación de la interdigitación de los filamentos de actina y miosina. La tropomiosina es una cadena larga de polipéptidos que se dispone en los sarcómeros entre los helices de actina. La troponina es una molécula globular unida a intervalos regulares a la tropomiosina. Adaptado de Williams, P y Warwick, R. (1980). Gray's Anatomy (36^a ed., pp. 596-315). Edinburgh: Churchill Livingstone.

Este diagrama detallado muestra la organización estructural del músculo con las siguientes etiquetas:

- A:** Músculo completo con Epimisio, Fascículo, Perimisio, Vaso sanguíneo, Fibra muscular individual (célula), Endomisio, Núcleo y Sarcolema.
- B:** Miofibrilla con Sarcómero y Miosina.
- C:** Sección transversal a nivel de una banda que muestra Filamento fino (actina) y Filamento grueso (miosina) rodeados por un puente cruzado.
- D:** Organización de la sarcómero que muestra Filamento de miosina y Filamento de actina.
- E:** Puente cruzado que muestra Tropomiosina y Troponina.

Estructura de los componentes contráctiles en un músculo.

Los filamentos finos son de actina, mientras que los gruesos, son de miosina. Ambos tipos de filamentos son muy cortos, ya que apenas llegan a unas micras. Alternan entre sí a lo largo de la fibra, aunque en una posición que permite la interdigitación, ya que cada filamento grueso queda situado entre dos finos, y a la inversa. A la altura de la mitad de cada banda de filamentos finos, están los discos Z. A la estructura situada entre dos discos Z consecutivos se la conoce con el nombre de Sarcómera, la cual debe considerarse como la unidad de acción contráctil. De esta manera, una sarcómera está compuesta por dos medias bandas de filamentos finos y una banda entera de filamentos gruesos. Estos últimos presentan una serie de pequeños segmentos transversales llamados puentes intermiofibrilares.

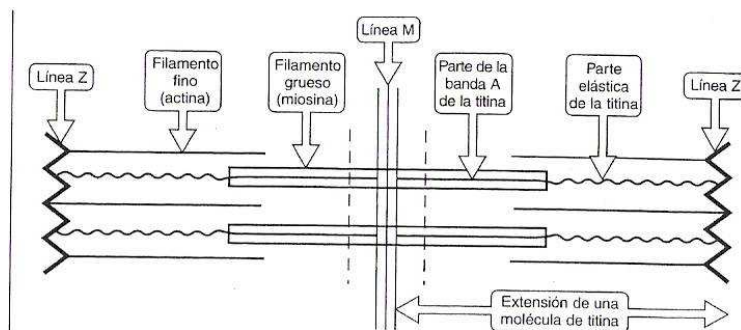
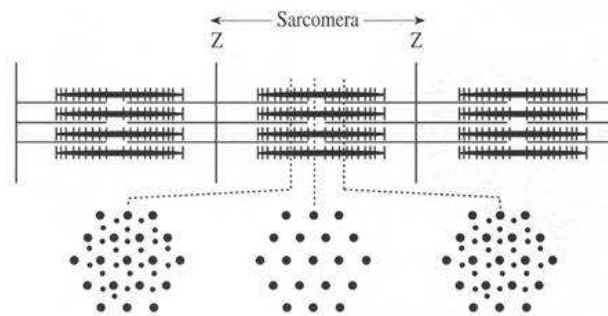
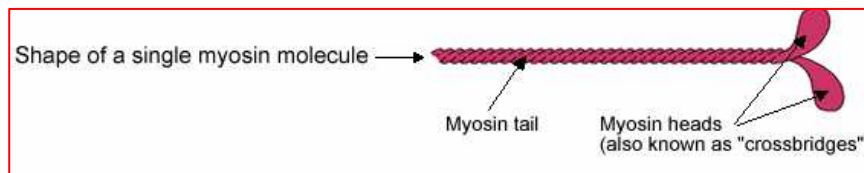
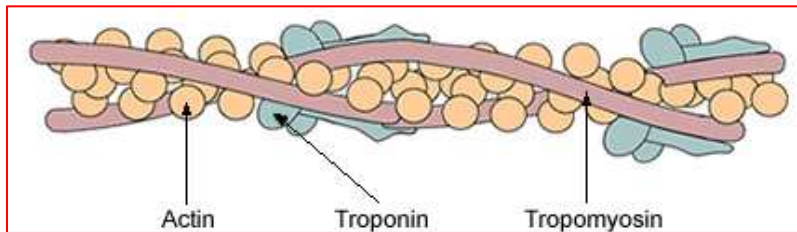
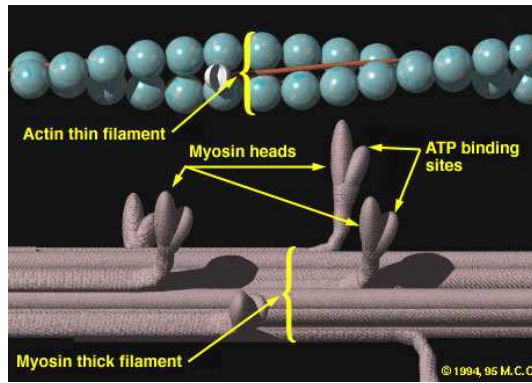
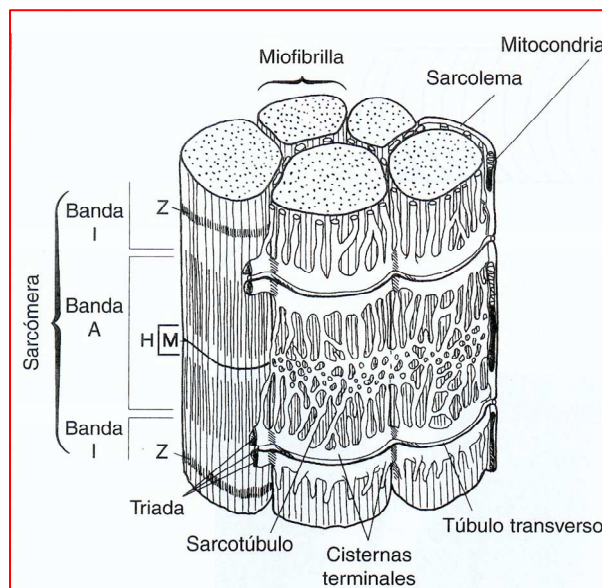


FIGURA 6-2

La disposición de las moléculas de titina dentro de la sarcómera. Adaptado de Craig, R. (1994). *The structure of the contract filaments*. In A. G. Engel y Franzini-Armstrong (eds.), *Myology* (2.ª ed., p. 150). New York: McGraw-Hill, Inc.



Estructura del músculo estriado, que muestra las disposiciones superpuestas de los filamentos que contienen actina y miosina, estos últimos con puentes transversales o interproyectándose sobre ellos.

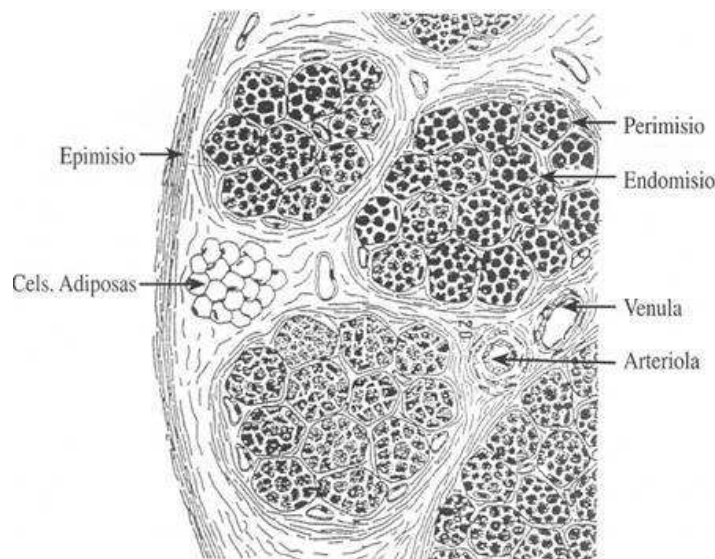


Toda esta disposición, en su conjunto, es la que da al músculo estriado su apariencia característica. En general, en la mayor parte de animales, la longitud de las bandas, ya sean de filamentos finos o gruesos, es constante, 1, 1 y 1,5 μm respectivamente, con lo que es más o

menos constante la longitud de la Sarcómera. No obstante, hay casos de Sarcómeras más largas, como en los crustáceos. Evidentemente, una mayor longitud de Sarcómera significa mayor número de puentes y mayor fuerza, pero también habrá menos Sarcómeras por fibra y esto implica una menor tasa media de acortamiento.

b) Elementos inertes o pasivos

Todo el músculo está rodeado por vainas o Fascias de tejido conjuntivo (Colágeno I, principalmente). El Epimisio rodea el músculo y se extiende dentro del mismo formando el Perimisio, que a su vez divide el músculo en una serie de fascículos, cada uno de los cuales contiene varias fibras musculares. Dentro del fascículo, las fibras musculares están separadas unas de otras por el Endomisio. Todos estos elementos, con proporciones variables de colágeno y fibras reticulares y elásticas, constituyen el componente elástico paralelo a las fibras.



Disposición del tejido conjuntivo que envuelve los diferentes elementos de un músculo estriado.

La masa muscular se continúa en sus extremos por una parte fibrosa o tendinosa, exclusivamente pasiva, que fijada a los huesos, transmite la tensión contráctil y suaviza sus variedades bruscas. Los tendones y expansiones aponeuróticas constituyen el elemento elástico en serie. Los tendones han sido considerados durante mucho tiempo como los principales elementos responsables del comportamiento elástico del músculo. No obstante, en ensayos in vitro se ha podido comprobar que sólo admiten alargamientos inferiores al 10% de la longitud en reposo, sin que se alteren sus características mecánicas

Mecánica del Músculo

- Modelo de Hill (1950)

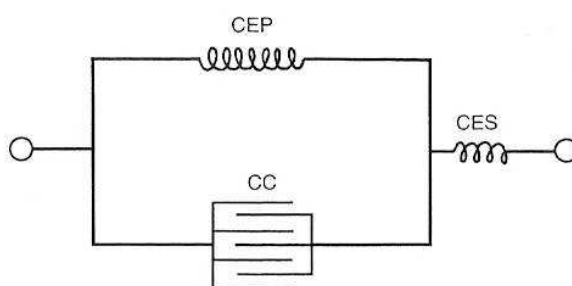
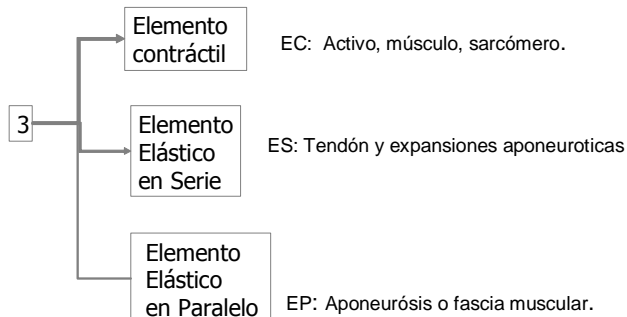


FIGURA 6-6

La unidad músculo-tendinosa puede describirse como una constitución de un componente contráctil (CC) en paralelo con un componente elástico (CEP) y en serie con otro componente elástico (CES). El componente contráctil se representa por las proteínas contráctiles de la miofibrilla, actina y miosina. (Los puentes de cruce de miosina pueden también mostrar cierta elasticidad). El componente elástico paralelo comprende el tejido conectivo que rodea las fibras musculares (el epimisio, perimisio y endomisio) y el sarcolema. Los componentes elásticos en serie se representan por los tendones.

Adaptado de Keele, C.A., Neil, E., y Joels, N. (1982). Muscle and the nervous system. En Samson Wright's Applied Physiology (13.ª ed., pp. 248-259). Oxford: Oxford University Press.

3. Tipos de fibras musculares

Como la función del músculo depende de las propiedades de sus fibras, es importante considerar cómo varían éstas, pues la mayoría de los músculos esqueléticos de los mamíferos están constituidos por una población heterogénea y característica de fibras de diferentes tipos. Los principales tipos de fibra muscular (I, II y algunos tipos intermedios), se pueden diferenciar mediante sus propiedades histoquímicas, ultraestructurales y fisiológicas. Así, las fibras de Tipo I, también denominadas lentas o rojas, tienen un metabolismo oxidativo y gran contenido en mioglobina, lo que le permite especializarse en contracciones potentes, lentas y duraderas, mientras que las fibras de Tipo II, también denominadas rápidas o pálidas, tienen un metabolismo glicolítico y están dedicadas a movimientos rápidos y precisos.

A nivel funcional, las fibras musculares se agrupan formando unidades motoras, que dependen de una sola motoneurona y que se contraen al unísono, siguiendo la ley del todo o nada cuando la célula nerviosa descarga. En una unidad motora, todas las fibras son del mismo tipo lento o rápido, y por tanto, puede hablarse también de unidades motoras lentas y rápidas. Sin embargo, los músculos contienen fibras o unidades motoras de ambos tipos, pero de acuerdo con la función principal, existe mayor proporción de una de ellas y se pueden denominar músculos lentos y rápidos. No obstante, por entrenamiento o cambio de actividad se puede alterar la proporción y reconvertirse un músculo de uno a otro tipo.

Cuando en un movimiento lento intervienen sinérgicamente varios músculos de diferente tipo, lo inician y mantienen los músculos con predominio de fibras rojas o lentas y sólo al final, si el esfuerzo es grande, intervienen también los de fibras pálidas o rápidas. En los movimientos rápidos, se invierte en general esta cronología. Si los músculos sinergistas son de composición parecida, se contraen conjuntamente en todo tipo de movimientos.

Tipos de fibras musculares.

- **Tipo I lentas (50%) gran resistencia.**
- **Tipo IIA oxidativa –glucolíticas rápidas (30-35%)**
- **Tipo IIB glucolíticas rápida (15-20%)**
- **Tipo IIC indiferenciada**

Característica	Fibras I	Fibra II a	Fibra II b
Tiempo de contracción	Larga	Rápida	Rápida
Fuerza contracción	Baja	Moderada	Alta
Fatigabilidad	Baja	Baja /regular	Alta
Tamaño UM	Pequeña	Grande	Grande
Umbral excitación	Baja	Moderada	Alta
Velocidad Conducción	Baja	Moderada	Alta
Nº de fibras musculares	Baja	Moderada	Alta

Entrenamiento muscular.

- Modifica la arquitectura (capacidad trófica).**
- Propiedades fisiológicas de las fibras**

Huso neuromuscular:

- **Sensible a cambios de longitud.**
- **Paralelo a fibras musc..**
- **Reflejo miotático.**

4. Clasificación por forma y disposición de las fibras.

Existen dos tipos principales de estructura muscular: la longitudinal o fusiforme y la penniforme.

A) Longitudinal o fusiforme

- Fibras de disposición paralelas
- Pequeña superficie transversal
- Constituyen músculos delgados y largos
- Generan baja tensión
- Gran capacidad de acortamiento
- gran velocidad de acortamiento

B) Penniforme (penado).

- El núcleo tendinoso asciende dentro del músculo.
 - Fibras se ordenan según ramificaciones (uni , bi o multipenados)
- El tendón esta dividido en varias inserciones.
- Fibras orientadas en sentido diagonal.
 - Gran superficie transversal
 - Constituyen músculos cortos y gruesos
 - Generan gran tensión
 - Baja capacidad de acortamiento
 - Baja velocidad de acortamiento

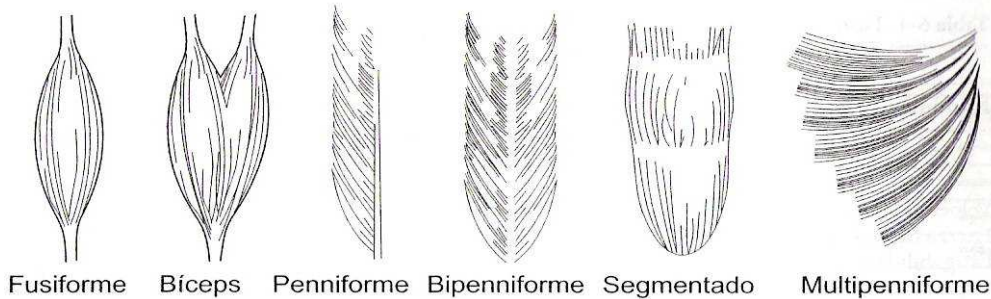
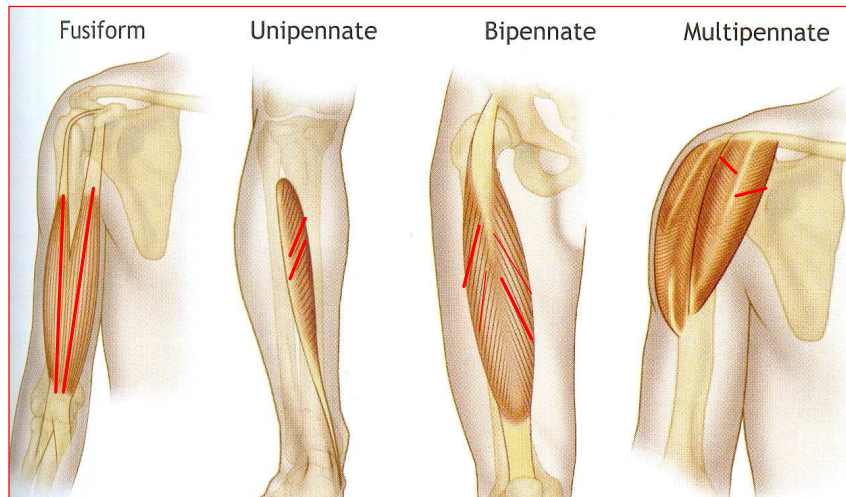


Figura 6-5. Tipos de músculos del cuerpo humano, según la disposición de sus fibras musculares.

Se ha demostrado que entre dos músculos de igual volumen y cuyas fibras actúan con la misma tensión (fuerza/superficie), el penniforme con un ángulo relativamente pequeño (como es lo usual), puede ejercer más fuerza que el de fibras paralelas.



> VELOCIDAD Y RANGO DE MOV.
FIBRAS EN LA LÍNEA DE ACCIÓN
MUSCULAR.

MAYOR POTENCIA, MOV. LENTO, FORMA DE "PLUMA"

- **Fibras paralelas = músculos más rápidos**
- **Fibras oblicuas = músculos más fuertes (Oblicuas = Mayor STFC o ASTF)**

5. Propiedades mecánicas de los músculos.

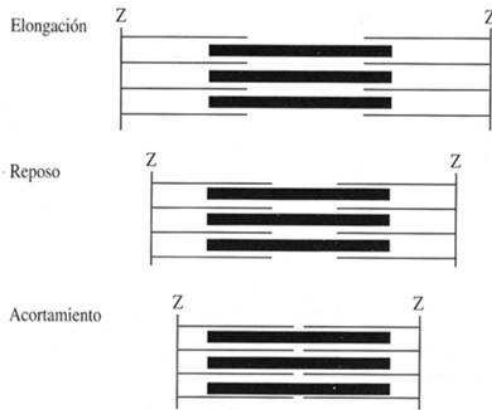
Los indicadores biomecánicos fundamentales que caracterizan la actividad del músculo son: la fuerza que se registra en su extremo (esta fuerza se denomina tensión o fuerza de tracción muscular), y la velocidad de variación de la longitud.

Cuando el músculo se excita, varía su estado mecánico; estas variaciones son denominadas contracción. La contracción se manifiesta en la variación de la **tensión o de la longitud del músculo (o de ambas)**, así como de otras de sus propiedades mecánicas (elasticidad, rigidez, etc.).

Si la estructura del músculo la consideramos como una combinación de sus elementos elásticos y contráctiles, veremos que los componentes elásticos, por sus propiedades mecánicas, son análogos a los resortes, es decir, para distenderlos hay que aplicar una fuerza. Por el contrario, los componentes contráctiles corresponden a aquellas partes de las sarcómeras del músculo donde los filamentos de actina y miosina se deslizan unos sobre otros y, en mayor o menor medida, según la intensidad de la contracción.

- Contracción muscular se manifiesta en:
 - a) Variación del estado mecánico de un músculo, (estimulación nerviosa).
 - b) La contracción se manifiesta en:
 - Variación de la tensión (Fuerza)
 - Variación de la longitud del músculo

Cuando el músculo se encuentra en estado de Reposo, existe solapamiento moderado de los puentes cruzados de miosina sobre actina. En estado de elongación, el solapamiento disminuye y puede llegar a ser nulo. Finalmente, durante la contracción, el solapamiento o superposición es máximo. El límite de solapamiento queda dado por el contacto entre los filamentos gruesos y los discos Z.

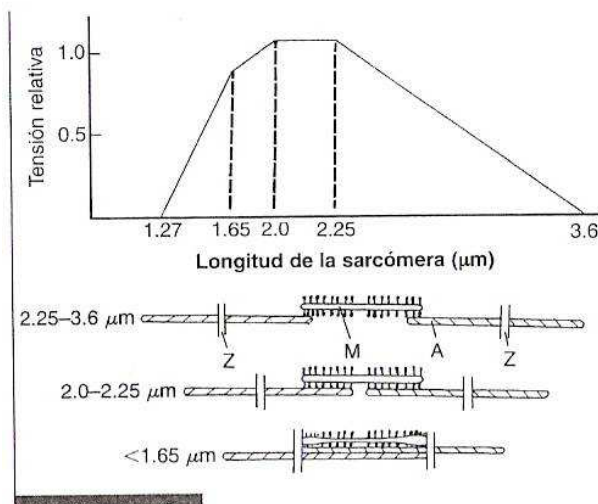


a) Relación tensión - longitud de una fibra muscular.

Estudia el comportamiento de tensión de una fibra muscular bajo contracción isométrica tetánica a diferentes longitudes de sarcómera. La capacidad de generar tensión depende estrechamente con el número de puentes cruzados (interfibrilares), del filamento de miosina superpuesto en el de actina.

- La tensión es máxima a la longitud slack o de reposo de la sarcómera (2 μm), donde la superposición de la actina sobre la miosina es máxima.
- La tensión cae progresivamente al aumentar la longitud de la sarcómera, hasta llegar a cero tensión, donde la superposición ya no existe (3.6 μm).
- La tensión también disminuye cuando la longitud de la sarcómera se reduce bajo la longitud de reposo (acortamiento), alcanzando cero tensión a las 1,27 μm .

La superposición extensiva (los dos filamentos de actina comienzan a superponerse), interfiere con la formación de puentes cruzados. Los extremos de los filamentos de miosina se encogen por la presión de las bandas z.

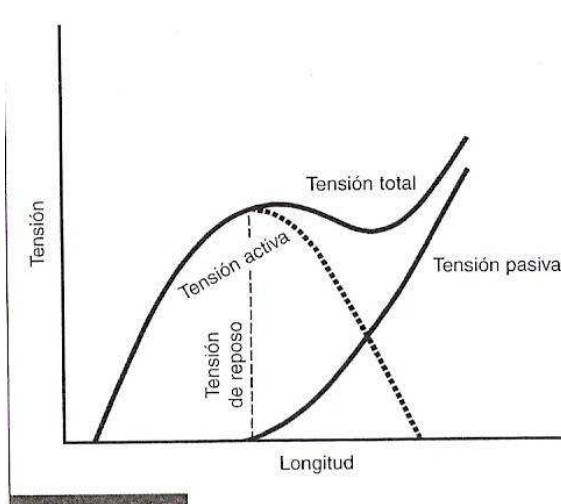


b) Relación tensión longitud del

Curva tensión-longitud de parte de una fibra muscular aislada, estimulada a diferentes longitudes. La tensión tetánica isométrica se relaciona estrechamente con el número de puentes cruzados en el filamento de miosina superpuestos por el filamento de actina. La tensión es máxima a la longitud del slack, o longitud de reposo, de la sarcómera (2 μm), donde la superposición es máxima, y cae hasta cero a la longitud donde la superposición ya no tiene lugar (3.6 μm). La tensión también disminuye cuando la longitud de la sarcómera se reduce bajo la longitud de reposo, cayendo profundamente a 1.65 μm y alcanzando cero a 1.27 μm cuando la superposición extensiva interfiere con la formación de puentes cruzados. La relación estructural de los filamentos de actina y miosina en varias etapas del acortamiento y estiramiento de la sarcómera se representa bajo la curva. A, filamentos de actina; M, filamentos de miosina; Z, líneas Z. Adaptado de Crawford, C.N.C. y James, N.T. (1980). *The design of muscles*. In R. Owen, J. Goodfellow, y P. Bullough (Eds.), *Scientific Foundations of Orthopaedics and Traumatology* (pp. 67-74). London: William Heinemann; como lo modificó de Gordon, A.M., Huxley, A.F.I., y Julian, F.J. (1966). *The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibers*. *J Physiol*, 184, 170.

músculo.

Estudia comportamiento de tensión de un músculo como un todo (elementos contráctiles y elásticos) bajo contracción isométrica tetánica. La curva de tensión activa, representa la tensión desarrollada por los elementos contráctiles del músculo. La curva denominada tensión pasiva refleja la tensión desarrollada cuando un músculo sobrepasa su longitud de reposo y la parte no contráctil del vientre muscular se estira. Esta tensión pasiva se desarrolla principalmente en los componentes elásticos en paralelo y en serie. Cuando el vientre muscular se contrae, la combinación de las tensiones activas y pasivas produce la tensión total ejercida. La curva demuestra que a medida que un músculo se estira progresivamente más allá de su longitud de reposo, la tensión pasiva crece y la tensión activa decrece.



La tensión activa y pasiva ejercida por el músculo completo contrayéndose isométrica y tetánicamente se representa en relación a la longitud muscular. La tensión activa se produce por los componentes contráctiles del músculo y la tensión pasiva por los componentes elásticos en serie y en paralelo, los cuales desarrollan la sollicitación cuando el músculo se estira más allá de su longitud de reposo. Cuanto mayor es la cantidad de estiramiento, más grande es la contribución del componente elástico a la tensión total. La forma de la curva activa generalmente es la misma en diferentes músculos, pero la curva pasiva, y de ahí la curva total, varía dependiendo de cuánto tejido conectivo (componente elástico) contiene el músculo. Adaptado de Crawford, C.N.C. y James, N.T. (1980). *The design of muscles*. En R. Owen, J. Goodfellow, y P. Bullough (Eds.), *Scientific Foundations of Orthopaedics and Traumatology* (pp. 67-74). London: William Heinemann.

Un músculo mueve todas las articulaciones sobre las cuales pasa. Así, existen músculos cortos, monoarticulares que mueven sólo una articulación, y músculos largos, poliarticulares que movilizan varias articulaciones.

La mayoría de los músculos que cruzan solamente una articulación, no suelen estirarse lo bastante como para que la tensión pasiva ejerza un papel importante, pero el caso es diferente para los músculos biarticulares, en los que pueden intervenir los extremos de la relación de tensión – longitud. Por ejemplo los isquiotibiales se acortan tanto cuando la rodilla está completamente flexionada que la tensión que pueden ejercer decrece considerablemente. Inversamente, cuando se flexiona la cadera y se extiende la rodilla, los músculos están tan estirados que la magnitud de su tensión pasiva previene más elongación y esto causa que la rodilla se flexione si se aumenta la flexión de la cadera.

c) Longitud de equilibrio.

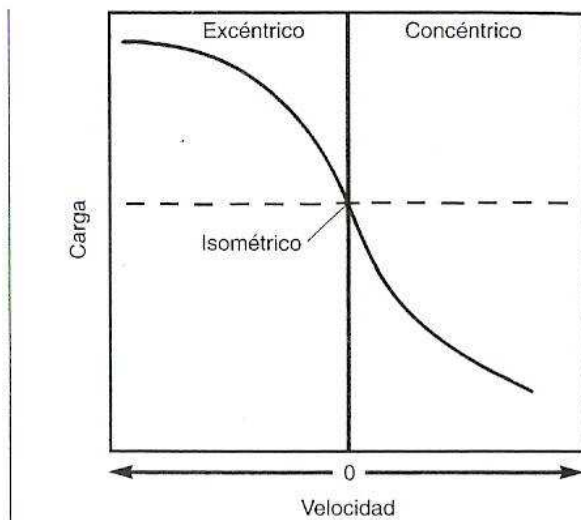
La longitud de equilibrio muscular, implica que las fuerzas elásticas del músculo son iguales a cero. En el organismo vivo, la longitud del músculo siempre es algo mayor que la longitud de equilibrio y por eso incluso el músculo relajado conserva cierta tensión. Cuando el músculo se distiende más allá de la longitud de equilibrio, comienzan a aparecer las fuerzas elásticas en los componentes elásticos paralelos.

6. Mecánica de la contracción muscular

Las características mecánicas de la contracción muscular dependen de la magnitud de la resistencia. Así, cuando aumenta la carga (resistencia, peso) se producen variaciones:

a) Relación carga – velocidad

Un músculo contrae con mucha rapidez cuando la carga es baja. No obstante cuando se aplican cargas la velocidad de contracción disminuye, siendo cada vez más lenta cuanto más grande sea la carga. Cuando la carga se iguala a la tensión que el músculo puede soportar, la velocidad se hace cero, es decir, el músculo se contrae isométricamente. Cuando la carga se incrementa todavía más, el músculo se alarga excéntricamente. Este alargamiento es más rápido con mayor carga.

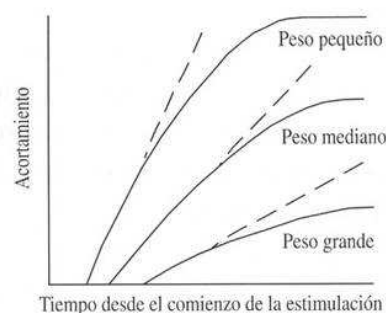


Curva de carga-velocidad generada representando la velocidad de movimiento del brazo de palanca del músculo en relación a la carga externa. Cuando la carga externa impuesta sobre el músculo es insignificante, el músculo se contrae concéntricamente con velocidad máxima. Con cargas que van incrementándose el músculo se acorta más lentamente. Cuando la carga externa iguala la fuerza máxima que el músculo puede ejercer, el músculo deja de acortarse (p. ej., tiene velocidad cero) y se contrae isométricamente. Cuando la carga se incrementa todavía más, el músculo se alarga excéntricamente. Este alargamiento es más rápido con mayor carga.

FIGURA 6-11

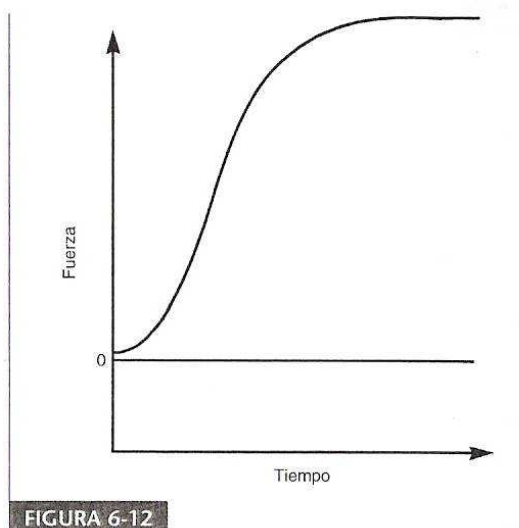
b) Periodo de Latencia

Al aumentar la carga, se incrementa el periodo de latencia. Este periodo de tiempo está relacionado con el tiempo que se necesita para lograr distender los componentes elásticos hasta que la fuerza de la tracción sobrepase la magnitud de la resistencia.



c) Relación tiempo – fuerza

La fuerza ejercida por un músculo es mayor cuando el tiempo de contracción es más largo, debido a que se requiere tiempo para que la tensión sea transferida desde los componentes elásticos paralelos al tendón.



Curva fuerza-tiempo para un músculo completo contrayéndose isométricamente. La fuerza ejercida por el músculo es mayor cuando el tiempo de contracción es más largo porque se requiere tiempo para que la tensión creada por los componentes contráctiles sea transferida al componente elástico paralelo a medida que la unidad músculo-tendinosa se estira.

FIGURA 6-12

7. Tipos de contracción muscular

El término contracción significa desarrollo de tensión dentro del músculo y no necesariamente un acortamiento visible del propio músculo.

En la contracción isométrica o estática ($F = R$), no hay cambio de longitud del músculo, porque los extremos están solidamente fijos o la resistencia iguala la capacidad de contracción. Al no haber desplazamiento, teóricamente y en términos de física, no se produce trabajo mecánico y toda la energía consumida se transforma en calor. Sin embargo, fisiológicamente, hay un trabajo expresado por la fuerza o tensión isométrica desarrollada durante un tiempo determinado, con costo energético, liberación de calor y fatiga.

En la práctica, no existe una contracción isométrica pura ya que aunque las inserciones de músculo queden fijas y no exista movimiento, las fibras musculares se acortan alrededor de un 7% a expensas del componente elástico en serie del tendón que cede al comienzo de la contracción. En cambio, en la contracción isotónica o dinámica, el músculo cambia de longitud y se produce un trabajo externo medible a partir de la fuerza y la distancia recorrida.

Así mismo, no toda la energía consumida se convierte en trabajo efectivo, ya que en parte es necesaria para neutralizar las fuerzas pasivas del acortamiento. Por eso la carga máxima en contracción isotónica en acortamiento es sólo un 80 % de la tensión máxima alcanzada en la contracción isométrica.

Según la dirección del cambio de longitud muscular, la contracción isotónica puede ser:

- en acortamiento, concéntrica, con trabajo positivo cuando la resistencia es menor que la potencia muscular ($F > R$)
- en alargamiento, excéntrica, con trabajo negativo, cuando la resistencia es superior. ($F < R$)

Recuadro 6-2 Tipos de trabajo y contracción muscular

Trabajo dinámico: El trabajo mecánico se realiza y se produce el movimiento articular a través de los siguientes modos de contracción muscular:

1. Contracción concéntrica (*con*, juntos; *centrum*, centro): Cuando los músculos desarrollan suficiente tensión para vencer la resistencia del segmento corporal, los músculos se acortan y provocan movimiento articular. El movimiento neto generado por el músculo es en la misma dirección que el cambio en el ángulo articular. Un ejemplo de contracción concéntrica es la acción del cuádriceps en la extensión de rodilla cuando se suben escaleras.
2. Contracción excéntrica (p. ej., fuera de; *centrum*, centro): Cuando un músculo no puede realizar suficiente tensión y es vencido por una carga externa, progresivamente se alarga en vez de acortarse. El momento muscular neto es en la dirección opuesta del cambio en el ángulo articular. Un propósito de la contracción excéntrica es decelerar el movimiento de una articulación. Por ejemplo, cuando se bajan escaleras, el cuádriceps trabaja excéntricamente para decelerar la flexión de la rodilla, decelerando de esta manera el miembro. La tensión que se aplica es menor que la fuerza de gravedad empujando el cuerpo hacia abajo, pero es suficiente para permitir la bajada controlada del cuerpo.
3. Contracción isocinética (*iso*, constante; *cinética*, movimiento): Este es un tipo de trabajo muscular dinámico en el cual el movimiento de la articulación se mantiene a una velocidad constante, y de ahí que la velocidad de acortamiento o alargamiento del músculo sea constante. Debido a que la velocidad se mantiene constante, la energía muscular no puede disiparse a través de la aceleración de la parte del cuerpo y se convierte por completo en un momento de resistencia. La fuerza muscular varía con cambios en su brazo de palanca a lo largo del rango de movimiento articular (Hislop y Perrine, 1967). El músculo se contrae concéntrica y excéntricamente con diferentes direcciones de movimiento articular. Por ejemplo, los músculos flexores de una articulación se contraen concéntricamente durante la flexión y excéntricamente durante la extensión, actuando como desaceleradores durante la última.
4. Contracción isoinercial (*iso*, constante; *inercial*, resistencia): Este es un tipo de trabajo muscular

dinámico en el que la resistencia contra la cual el músculo debe contraerse permanece constante. Si el momento (torque) producido por el músculo es igual a o menor que la resistencia a vencer, la longitud muscular permanece igual y el músculo se contrae isométricamente. Si el momento es mayor que la resistencia, el músculo se acorta (se contrae concéntricamente) y provoca la aceleración de la parte corporal. La contracción isoinercial tiene lugar, por ejemplo, cuando se levanta una carga externa constante. En los extremos del movimiento, la inercia de la carga debe vencerse; los músculos implicados se contraen isométricamente y el torque muscular es máximo. En la mitad del rango de movimiento, con la inercia vencida, los músculos se contraen concéntricamente y el torque es submáximo.

5. Contracción isotónica (*iso*, constante; *tonico*, fuerza): Este término se usa normalmente para definir la contracción muscular en la cual la tensión es constante a lo largo de un rango de movimiento articular. Este término no tiene en cuenta los efectos del brazo de palanca en la articulación. Sin embargo, debido a que el brazo del momento de la fuerza muscular cambia a lo largo del rango de movimiento articular, la tensión muscular también debe cambiar. Por ello, la contracción muscular isotónica no existe en realidad en la producción del movimiento articular (Kroll, 1987).

Trabajo estático: No se realiza trabajo mecánico y la postura o la posición articular se mantiene a través de la siguiente forma de contracción muscular:

1. Contracción isométrica (*iso*, constante; *metrica*, longitud): Los músculos no siempre están directamente implicados en la producción de movimientos articulares. Ellos podrían ejercitar tanto una acción de control o de mantenimiento, tal como la necesitada para mantener el cuerpo en una posición erguida oponiéndose a la fuerza de la gravedad. En este caso los músculos intentan acortarse (p. ej., las miofibrillas se acortan y, al hacerlo, se estiran los componentes elásticos en serie, produciendo por ello tensión), pero esto no vence la carga y provoca movimiento; en cambio, esto produce un momento que soporta la carga en una posición fija (p. ej., mantiene la postura) porque no tienen lugar cambios en la distancia entre los puntos de inserción muscular.

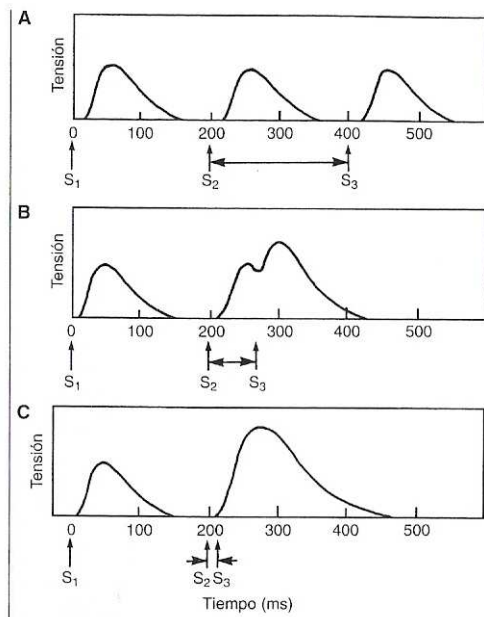


FIGURA 6-7

Sumación de las contracciones en un músculo mantenido a una longitud constante. **A**, Un estímulo inicial (S_1), se aplica a un músculo, y la contracción resultante dura 150 ms. El segundo (S_2) y tercer (S_3) estímulo se aplican al músculo después de intervalos de 200 ms cuando el músculo se ha relajado completamente, así no tiene lugar la sumación. **B**, S_1 se aplica 60 ms después de S_2 , cuando la respuesta mecánica de S_2 está comenzando a disminuir. El pico de tensión resultante es mayor que el de la única contracción. **C**, El intervalo entre S_2 y S_3 se reduce más hasta los 10 ms. El pico de tensión resultante es incluso mayor que en **B**, y el incremento en la tensión produce una curva suave. La respuesta mecánica provocada por S_3 aparece como una continuación de la provocada por S_2 . Adaptado de Luciano, D.S., Vander, A.J., y Sherman, J.H. (1978). *Human Function and Structure* (pp. 113-136). New York: McGraw-Hill.

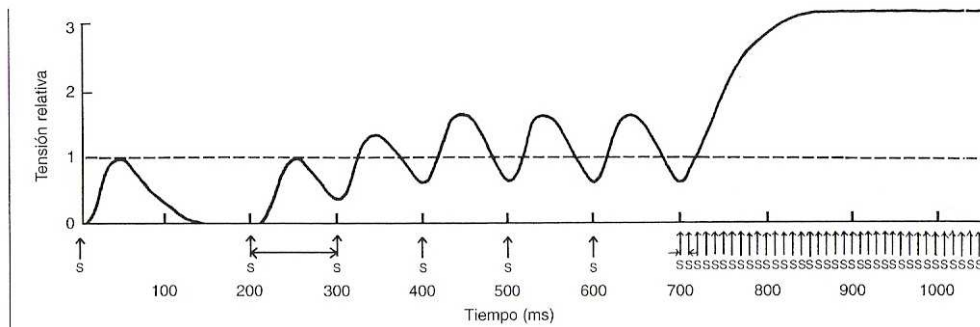


FIGURA 6-8

Generación de la tetanización muscular. Cuando la frecuencia de estimulación (E) incrementa (p. ej., los intervalos se acortan de 200 a 100 ms), la tensión muscular aumenta como un resultado de la sumación. Cuando la frecuencia se incrementa a 100/segundo, la

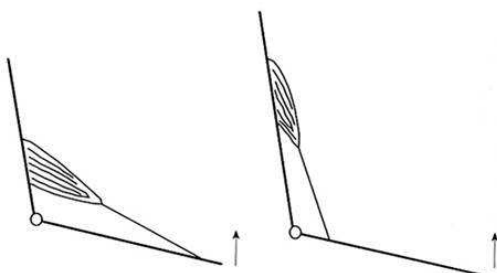
sumación llega a ser máxima y el músculo se contrae tetánicamente, ejerciendo un pico de tensión mantenido. Adaptado de Luciano, D.S., Vander, A.J., y Sherman, J.H. (1978). *Human Function and Structure* (pp. 113-136). New York: McGraw-Hill.

8. Clasificación biomecánica de los músculos

En cada articulación actúan diferentes músculos y en cada movimiento intervienen varios de ellos. Al más activo se le llama motor o agonista. Cuando el esfuerzo lo requiere le ayudan los motores secundarios. Algunos autores llaman sinergistas a los motores secundarios ya que colaboran a la acción del agonista, pero otros autores prefieren reservar este nombre a los músculos que realizan una acción diferente pero necesaria para la acción del agonista; por ejemplo, para flexionar los dedos en la garra es necesario estabilizar la muñeca en extensión dorsal, siendo los músculos radiales (extensores de la muñeca), los sinergistas de los flexores. El músculo antagonista realiza el movimiento opuesto. Así mismo, hay veces que un mismo músculo desempeña diferentes papeles en varios movimientos. Sin embargo, en la práctica se habla de fuerzas y movimientos articulares globales y, así por ejemplo, se mide el momento flexor de una articulación como resultante de la acción de los flexores en conjunto modificada por los sinergistas y antagonistas que actúan de estabilizadores.

9. Músculo motores y estabilizadores.

Los músculos estabilizadores tienen un origen en el segmento fijo cercano a la articulación y una inserción en el segmento móvil mucho más alejada. Su línea de acción es casi paralela al hueso móvil y por tanto puede actuar poco como músculo motor y su función es fundamentalmente estabilizadora articular por el componente longitudinal de su fuerza (Ejemplo: el supinador largo en la flexión de codo). Por el contrario, el músculo motor tiene un origen alejado en el segmento fijo, y cercano en el móvil. La línea de acción cambia notablemente durante el movimiento articular, se hace perpendicular al hueso móvil, favoreciendo mecánicamente el papel motor del músculo (Ejemplos: el bíceps y el braquial anterior en la flexión del codo). Sin embargo, si se invierten los segmentos móvil y fijo (por ejemplo en la flexión del codo en elevación en las anillas) el bíceps pasa a ser estabilizador y el supinador largo motor.



Músculo motor y estabilizador. Obsérvese que en el músculo motor, la línea de acción se hace perpendicular al segmento móvil, mientras que el estabilizador, al estar situada la línea de acción más oblicuamente sobre el segmento móvil, la potencia muscular disminuye.

Los músculos pluriarticulares, interponen dos o más articulaciones entre sus inserciones y los momentos de fuerza que crean en cada articulación que cruzan, dependen de la longitud del brazo del momento en cada una de ellas y de la fuerza que realiza el músculo. En general, tienen una de las articulaciones en la que el brazo del momento es mayor, y de la que son motores principales.

FACTORES QUE AFECTAN LA FUERZA MUSCULAR

- Temperatura
- Hipertrofia (Entrenamiento)
- Hipotrofia
- Fatiga
- Pre-estiramiento

Factores que influyen en la fuerza muscular

- Frecuencia (descarga de P. ACCIÓN)
- Longitud (longitud idónea)
- Buen funcionamiento del sistema nervioso central.
- Forma y tamaño del músculo
- Numero de fibras musculares (UM) = Motricidad.
- Modalidad de la contracción (CC; CE; CI)
- Factores mecánicos:
 - Angulo de tracción (descomposición de fuerzas)
 - Disposición de las fibras
 - Tipo de palanca
 - VM

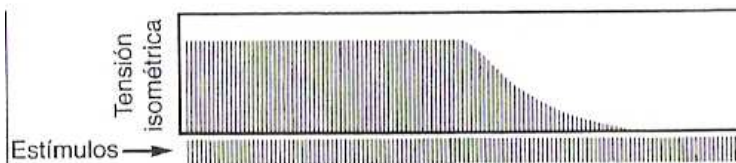


FIGURA 6-14

Fatiga en un músculo contrayéndose isométricamente. La estimulación prolongada tiene lugar a una frecuencia que sobrepasa la capacidad del músculo para producir suficiente ATP para la contracción. Como resultado, la producción de tensión disminuye y finalmente cesa.

Adaptado de Luciano, D.S., Vander, A.J., y Sherman, J.H. (1978). Human Function and Structure (pp. 113-136). New York: McGraw-Hill.

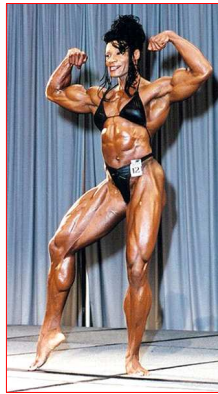
Factores fisiológicos:

- Edad (peak fuerza 25 años, luego)
- Género: (dp de pubertad > hombres. Factores hormonales)
- Peso corporal (IMC)
- Entrenamiento (si / no / sobreentrenamiento???)
- Otros factores (motivación, tipo de entrena%, forma de entrena%, etc.)

Generalidades

- Efectos del entrenamiento :
- La atrofia aumenta con la edad especialmente en fibras tipo II
- Entrenamiento de resistencia: carga baja, repetición alta.
- Entrenamiento de fuerza: carga alta, repetición baja, hipertrofia y potencia

HIPERTROFIA

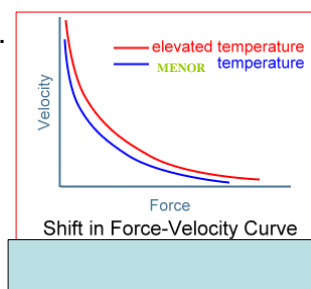


Condición de estiramiento:
Un músculo acortado genera menos tensión.

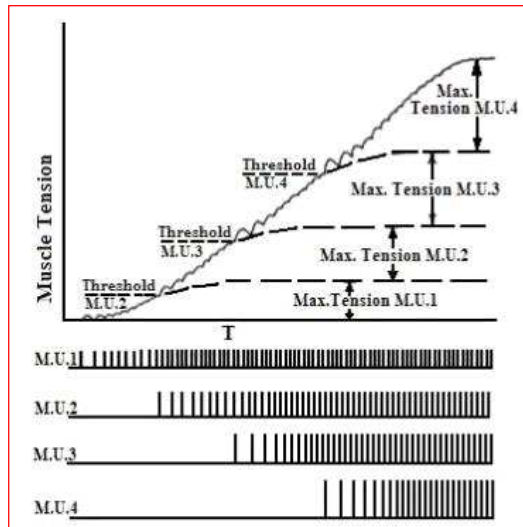


TEMPERATURA

- Vel. Conducción Nerv.
- Act. Enzimática
- Elasticidad elementos pasivos.

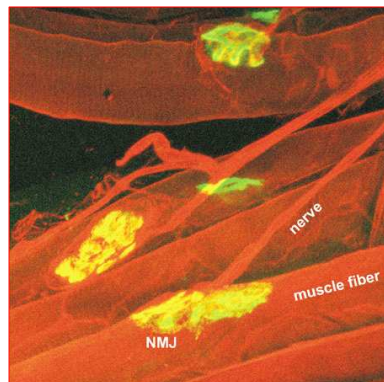


GENERACIÓN DE FUERZA

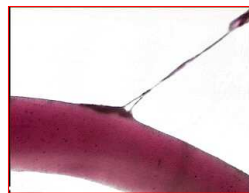


Tensión Global = Sumatoria de las tensiones de c/unidad motora.

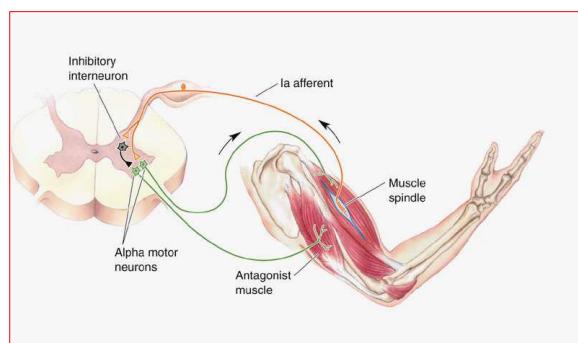
UNIDAD MOTORA



1 MOTONEURONA +
TODAS LA FIBRAS
MUSCULARES QUE
INERVA...



INIIBICIÓN RECIPROCA



10. Patomecánica de la lesión muscular.

Se sabe que hacer ejercicio es altamente recomendado para nuestra salud, tanto física, mental como espiritual. Pero también es un hecho que si no sabemos cómo ejecutar correctamente estos ejercicios, aumenta el riesgo de sufrir lesiones óseas o musculares, ya sean fracturas o desgarros, respectivamente.

Se define como desgarro muscular a una lesión traumática en el interior del músculo que consiste en la laceración de mayor o menor números de sus fibras. Las fibras del tejido se rompen y sangran produciendo en seguida una hemorragia (hematoma). Se pueden romper las propias fibras musculares, encargadas de la contracción muscular, como también el tejido conjuntivo que envuelve y amarra las fibras musculares.

Al sufrir un desgarro muscular también se ven afectadas otras estructuras circundantes, como por ejemplo los vasos sanguíneos. Ellos recorren todo el músculos encargándose de su nutrición y de la recopilación de los desechos del trabajo muscular (catabolitos).

Generalmente los músculos que más se ven afectados por los desgarros, son los de las extremidades y espalda. Normalmente se producen por movimientos bruscos o inadecuados sin haber hecho un calentamiento previo, es por eso que son frecuentes al inicio de una actividad o juego.

También es frecuente que se produzcan por un esfuerzo excesivo, más allá de la fatiga muscular. La gravedad del desgarro va a depender del tipo de músculo al que afectaron y del porcentaje de éste que se vio perjudicado. Por lo general las heridas musculares se clasifican de dos maneras, dependiendo de su gravedad:

- 1.- Elongaciones o contracturas, que es una lesión mínima que sólo afectan al tejido conjuntivo y produce una leve hemorragia.
- 2.- Desgarros, con diferentes grados de lesión de las fibras musculares (parcial o total), con hemorragia consecuente de distinta magnitud, palpable en el examen clínico.

Los síntomas de un desgarro muscular son:

- Dolor local muy intenso que se exagera con un mínimo movimiento.
- Impotencia funcional del miembro o de la región del cuerpo afectada.
- Inflamación de la región, a menudo afectada por el hematoma formado.

Dentro de los factores de riesgo que facilitan la producción de desgarros podemos encontrar:

a) El sedentarismo conlleva un desentrenamiento, pérdida de las capacidades circulatorias y atrofia muscular, entre otras. Esto provoca un debilitamiento del tejido conjuntivo que envuelve a las fibras, por lo tanto, son más propensas a sufrir laceraciones.

b) La desnutrición crónica, debilita la capacidad contráctil de las fibras musculares (se adelgazan).

c) La mala circulación arterial y venosa, que no es capaz de soportar el mayor flujo de sangre que necesita la persona durante el ejercicio, lo cual intoxica al propio músculo.

d) Ciertas enfermedades del metabolismo como la diabetes.

Cuando ocurre un desgarro muscular se recomienda que la persona haga reposo de inmediato

y se ponga hielo en esa zona durante media hora por lo menos. De ese modo evita que la hemorragia sea mayor y por tanto su recuperación se alargue innecesariamente. También se puede colocar una venda compresiva, para evitar y minimizar la posible hemorragia.

Después de 36-48 horas y en los siguientes días debe aplicarse calor en la zona afectada. En casa puede usarse una almohadilla térmica y en centros asistenciales los Kinesiólogos tienen equipos de fisioterapia, como la onda corta (ultratermia), el ultrasonido, distintos tipos de electroterapia, el Láser, etcétera. Se aplica calor para aumentar el metabolismo de la zona lesionada y hacer más rápida la recuperación. Para este mismo objetivo, también es recomendable tomar antiinflamatorios.

Luego de esto se recomienda hacer reposo relativo, vale decir, hacer actividades de la vida diaria sin mucha fuerza.

Estudio de un caso 6-1

Desgarro del músculo gastrocnemio

Un atleta profesional de 22 años se desgarró su gastrocnemio durante una carrera (Fig. 6-1-1). La sobrecarga tensil que ocurre durante las contracciones concéntricas y excéntricas vigorosas incrementa el riesgo de lesión, especialmente cuando las fuerzas implican a músculos biarticulares como el gastrocnemio. Este trauma indirecto se asocia con fuerzas tensiles elevadas durante la contracción rápida (alta velocidad) y cambios continuados en la longitud muscular. El estado de la contracción muscular al tiempo de la sobrecarga normalmente es excéntrico, y la rotura muy a menudo tiene lugar sobre o cerca de la unión miotendinosa a menos que el músculo haya sido dañado previamente (Kasser, 1996). La tumefacción procedente de la hemorragia se produce inicialmente en la fase inflamatoria. La respuesta celular es más rápida y la reparación es más completa si no se dañan los canales vasculares y no se altera la nutrición tisular. El grado de lesión debido a una sobrecarga tensil dictará la respuesta potencial del sujeto y el tiempo necesario para la reparación.