

# FISIOLOGÍA SISTEMA MUSCULAR

## Introducción

---

El movimiento es consecuencia de la contracción y relajación alternante de los músculos, que representan 40-50% del total de peso corporal.

La fuerza muscular refleja la función primordial del músculo: cambiar energía química (en forma de ATP) en energía mecánica para generar fuerza, realizar un trabajo y producir movimiento.

El estudio científico de los músculos corresponde a la miología.

## Tipos de tejido muscular

---

Existen tres tipos de tejido muscular:

**Tejido muscular esquelético.**

**Tejido muscular cardíaco.**

**Tejido muscular liso.**

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

## Tejido muscular esquelético

Recibe este nombre porque se inserta fundamentalmente en los huesos y mueve partes del esqueleto.

El tejido muscular esquelético también se llama estriado porque cuando se estudia con el microscopio pueden verse bandas claras y oscuras alternantes, como estriaciones. Es un músculo voluntario debido a que se contrae y relaja bajo un control consciente.

## Tejido muscular cardíaco

Forma parte de la mayor parte del corazón. También es un músculo estriado, pero a diferencia del músculo esquelético, es involuntario.

El músculo cardíaco contiene un sistema de marcapasos que hace que el corazón lata; este ritmo intrínseco recibe el nombre de **ritmo autónomo**, siendo los ajustes de frecuencia posibles gracias a la influencia de distintas hormonas y neurotransmisores sobre el marcapasos.

## Tejido muscular liso

Al microscopio aparece como un tejido liso, es decir, sin estriaciones.

Se encuentra en las paredes de estructuras internas huecas, como los vasos sanguíneos, el estómago y el intestino, así como en la mayor parte de los órganos abdominales. También se encuentra en la piel, unido a los folículos pilosos.

Es involuntario y a menudo posee un ritmo autónomo influido por determinadas hormonas y neurotransmisores.

## Funciones del tejido muscular

---

El tejido muscular lleva a cabo tres funciones:

Movimiento.

Estabilidad.

Termogénesis.

### Movimiento

En la musculatura esquelética los movimientos son posibles gracias a un funcionamiento integrado de los huesos, las articulaciones y los propios músculos.

En la musculatura cardíaca, las contracciones musculares (latidos) implican el movimiento de sangre por todo el organismo.

En la musculatura lisa, la contracción de la fibra lisa del aparato digestivo permite la mezcla de alimentos, o bien el sistema urinario, la expulsión de orina.

### Estabilización

La contracción de musculatura estriada esquelética mantiene el cuerpo en posición estable, como son la erecta o la sedente. Los músculos posturales se contraen de forma mantenida cuando la persona está despierta; por ejemplo, la contracción parcial de los músculos del cuello mantiene la cabeza derecha.

De forma similar, las contracciones mantenidas de los músculos lisos pueden evitar la salida de contenido de un órgano hueco. Por ejemplo, el mantenimiento de los alimentos en el estómago o el mantenimiento de orina en la vejiga urinaria.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

## **Termogénesis**

Cuando el músculo esquelético se contrae para realizar un trabajo se produce, como producto colateral, calor. Se cree que las contracciones musculares generan hasta un 85% de todo el calor del organismo, por lo que gran parte de este calor liberado se utiliza para mantenimiento de la temperatura corporal.

Por otra parte el músculo liso también puede mantener la temperatura corporal:

Si hace mucho calor ambiental se relaja la musculatura lisa de las paredes arteriolares, produciendo vasodilatación con pérdida de calor corporal.

Si hace mucho frío ambiental, la musculatura lisa se contrae, produciendo vasoconstricción, con lo cual se disminuye la pérdida de calor corporal.

## **Características del tejido muscular**

---

El tejido muscular tiene cuatro características principales que le permiten el mantenimiento de la homeostasis.

Excitabilidad.

Contractibilidad.

Extensibilidad.

Elasticidad.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

## **Excitabilidad**

Es la capacidad de responder a determinados estímulos produciendo señales eléctricas denominadas potenciales de acción o impulsos. Estos potenciales de acción se producen por inversión eléctrica del potencial de membrana en reposo. Los estímulos desencadenantes de la producción de estos potenciales de acción son químicos: neurotransmisores liberados por las neuronas u hormonas distribuidas en la sangre.

## **Contractibilidad**

Es la capacidad que tiene el tejido muscular para acortarse y engrosarse, generando fuerza para realizar un trabajo. El músculo se contrae (se acorta) como respuesta a uno o más potenciales de acción.

## **Extensibilidad**

El músculo puede ser extendido sin que sufra daño. La mayoría de músculos se disponen en parejas. Mientras uno se contrae, el otro no sólo está relajado sino que, generalmente, se distiende.

## **Elasticidad**

Significa que el tejido muscular tiende a volver a su forma original después de la contracción o de la extensión.

## TEJIDO MUSCULAR ESQUELÉTICO

El tejido muscular esquelético es el que está asociado a los huesos y a las articulaciones de los mismos. Los extremos de los músculos esqueléticos se insertan en estructuras óseas mediante tendones constituidos por tejido conjuntivo muy resistente. Cuando un músculo se contrae disminuye su tamaño y da lugar a una tensión de los tendones y de los huesos en los que se inserta.

La tensión muscular causa el movimiento de los huesos en las articulaciones, de manera que unos huesos presentan mayor movimiento que otros.

La zona de fijación ósea del músculo que presenta mayor movilidad y que se denomina **inserción** es estirada hacia la zona de fijación con menor movilidad que se denomina **origen** del músculo.

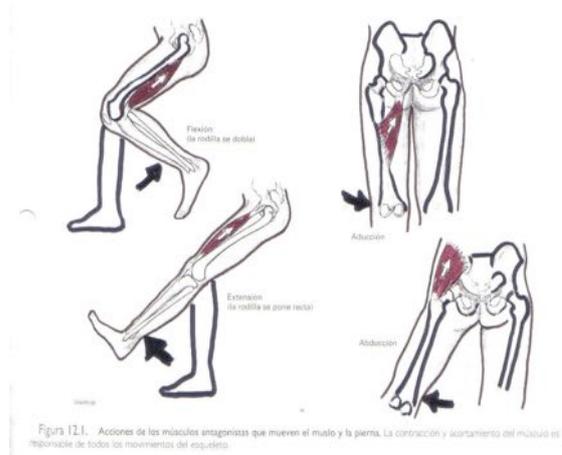
Son posibles varias clases de movimiento esquelético, según el tipo de articulación implicada y según las zonas de fijación de los músculos.

### Acciones de los músculos esqueléticos

<u>Categoría</u>	<u>Acción</u>
Extensor	Aumenta el ángulo articular.
Flexor	Disminuye el ángulo articular.
Abductor	Aleja el miembro de la línea media.
Aductor	Acerca el miembro a la línea media.
Elevador	Desplaza la inserción hacia arriba.
Depresor	Desplaza la inserción hacia abajo.
Rotador	Realiza rotación del hueso alrededor del eje
Esfínter	Cierre de una abertura. ____

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

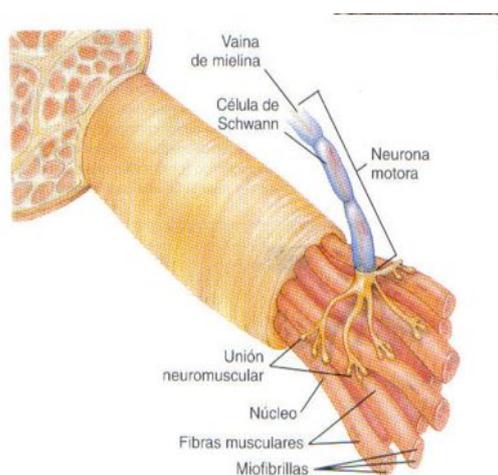
El elemento principal de cualquier movimiento esquelético es el **músculo agonista**; por ejemplo, en los movimientos flexores el músculo agonista es el flexor. Los músculos flexores y extensores que actúan en la misma articulación dando lugar a acciones opuestas son **músculos antagonistas**.



Para comprender la forma en que la contracción del músculo esquelético se traduce en movimiento, es necesario conocer algo de su inervación e irrigación, de los componentes del tejido conjuntivo y de su anatomía microscópica.

## Inervación e irrigación

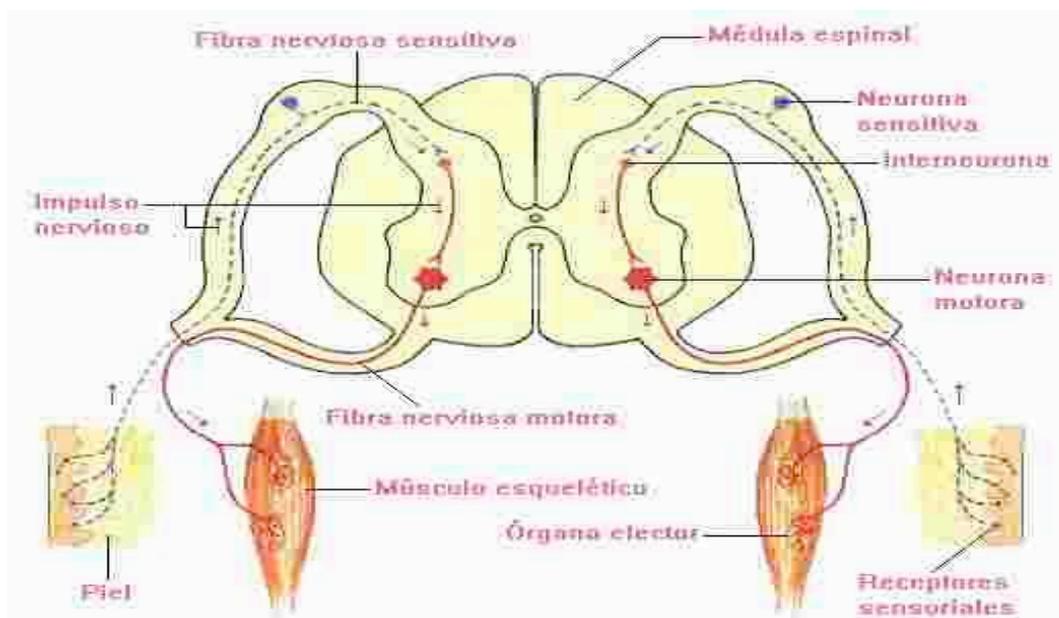
Las neuronas que estimulan la contracción del músculo esquelético reciben el nombre de neuronas motoras.



Una neurona motora es la que emite el impulso que, en último término, hace que la fibra muscular se contraiga. La neurona motora y el conjunto de todas las fibras musculares a las que estimula constituyen una **unidad motora**.

## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

Una sola neurona motora establece contacto con un promedio de 150 fibras musculares. Todas las fibras musculares de una unidad motora se contraen y relajan al mismo tiempo.



Los músculos que controlan movimientos precisos, como la producción de la voz por la laringe, pueden tener tan sólo dos o tres fibras por unidad motora. Los músculos del organismo responsables de movimientos potentes y poco precisos, como el bíceps braquial, pueden llegar a tener hasta 2000 fibras musculares por unidad motora.

Cuando el músculo se contrae, utiliza una gran cantidad de ATP y, por tanto, necesita grandes cantidades de elementos nutritivos y de oxígeno para producir dicho ATP. Además, ha de eliminar los productos de desecho de las reacciones por las que se produce el ATP. Así, una acción muscular prolongada depende de una rica irrigación que le aporte los elementos nutritivos y el oxígeno necesarios y que retire los desechos y el calor.

**Los capilares son muy abundantes en el tejido muscular; cada fibra muscular está en estrecho contacto con uno o más capilares.**

## Componentes del tejido conjuntivo

---

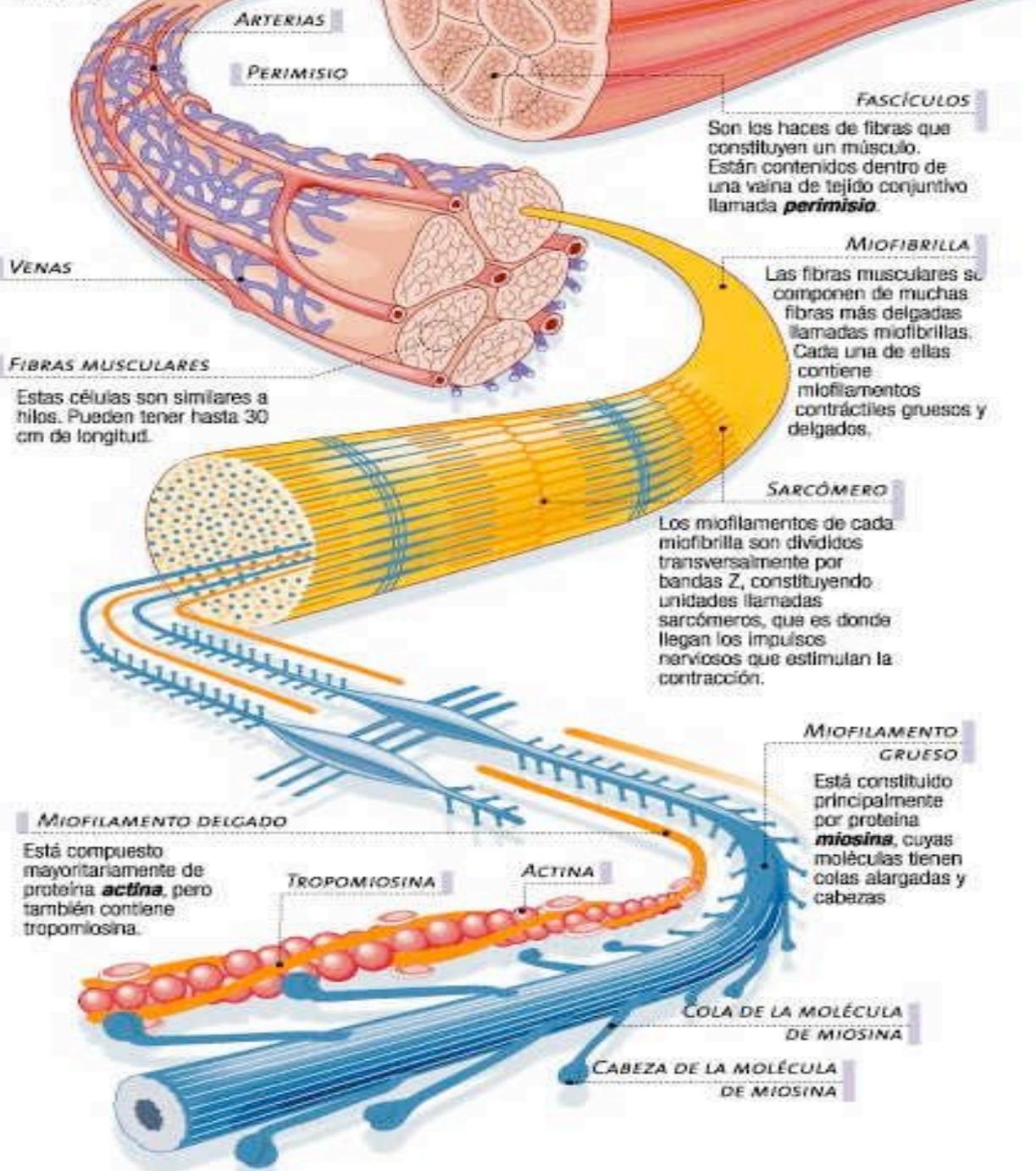
El tejido conjuntivo rodea y protege el tejido muscular. Envolviendo al músculo se encuentra la **fascia**, una capa de tejido conjuntivo fibroso, que se divide en dos bandas:

- ✓ La **fascia superficial**, la cual proporciona protección mecánica contra traumatismos y aislamiento frente a la pérdida de calor.
- ✓ La **fascia profunda**, la cual mantiene a los músculos unidos y lleva los nervios y los vasos sanguíneos y linfáticos, rellenando también los espacios existentes entre los músculos. A partir de la fascia profunda se extienden tres capas de tejido conjuntivo denso e irregular que protegen y refuerzan aún más a los músculos esqueléticos:
  - **Epimisio**: Es la capa más externa, rodeando a cada uno de los músculos.
  - **Perimisio**: Rodea los haces (fascículos) compuestos por 10 a 100 o más fibras musculares individuales.
  - **Endomisio**: Separa y rodea a cada una de las fibras musculares.
- ✓ El epimisio, perimisio y endomisio se continúan y proporcionan fibras de colágeno comunes al tejido conjuntivo que une los músculos a otras estructuras, como los huesos u otros músculos:
  - **Tendón**: Cuerda de tejido conjunto denso que une los músculos al periostio del hueso.
  - **Aponeurosis**: Es un tendón que se prolonga formando una capa ancha y plana. Ej: Aponeurosis epicraneal de la parte superior del cráneo, aponeurosis de la palma de la mano o planta del pie.
  - **Vainas tendinosas**: Son estructuras tubulares de tejido conjuntivo por donde discurren algunos tendones y que permiten un mejor deslizamiento de éstos. Ej: tendones de la muñeca y del tobillo.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

## Bajo el microscopio

Los músculos parecen una masa de carne compacta. Sin embargo están compuestos por haces de pequeñas fibras. Cada fibra es una célula muscular que posee una microestructura fibrosa formada por filamentos gruesos y delgados, dentro de unidades llamadas sarcómeros.



# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

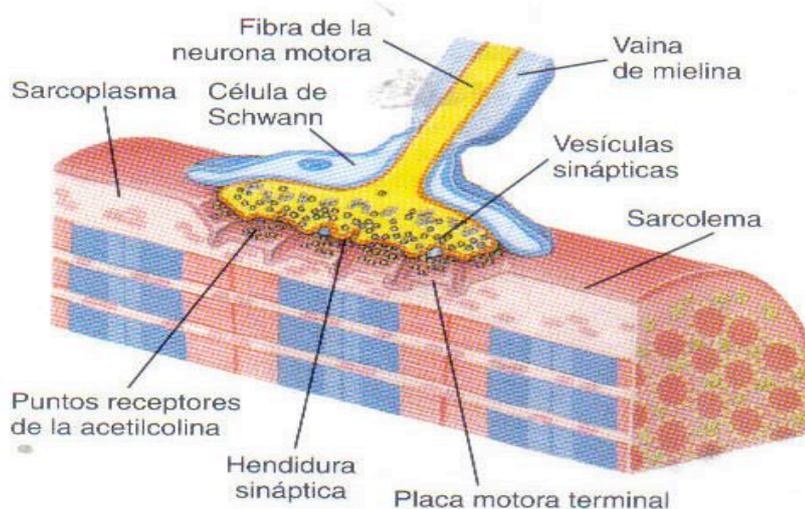
## Unión neuromuscular

---

Las células excitables (neuronas y fibras musculares) establecen contacto y se comunican en regiones especializadas denominadas sinapsis.

La mayoría de sinapsis neuromusculares presentan:

- Neurona presináptica. Terminal axonal.
- Hendidura sináptica. Espacio entre las dos células.
- Fibra muscular, postsináptica. Placa motora Terminal.



Como las células no se tocan físicamente, el potencial de acción de una de ellas no puede saltar la hendidura para excitar a la siguiente. En lugar de ello, la primera célula se comunica con la segunda liberando una **sustancia química denominada neurotransmisor** que se encuentra almacenado en las vesículas sinápticas situadas en la terminal axonal.

## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

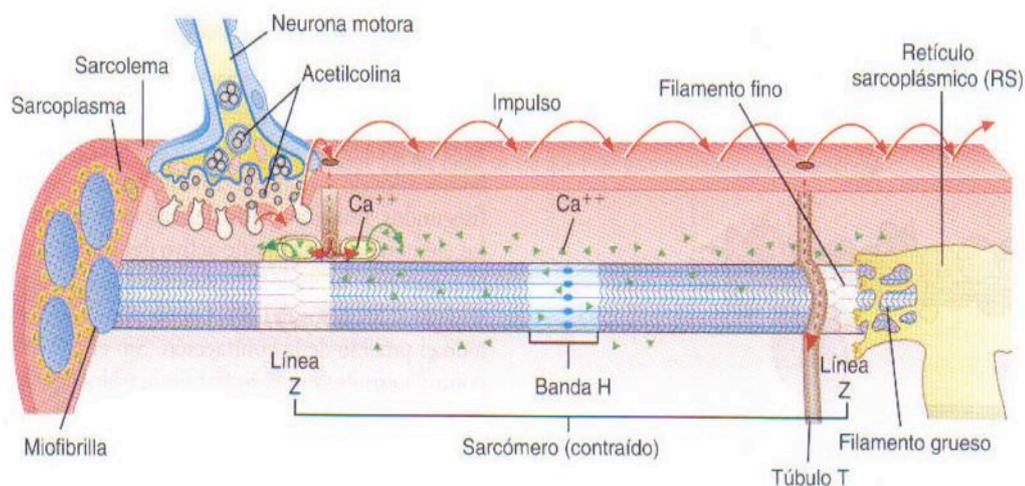
El término unión neuromuscular abarca tanto las terminales axonales de la neurona como las placas motoras terminales de las fibras musculares.

Aunque existen muchos neurotransmisores, el único que se libera en las uniones neuromusculares es la **acetilcolina**.

Cuando un impulso nervioso (potencial de acción) llega a la terminal axonal, desencadena una excitación de las vesículas sinápticas. Se libera acetilcolina a la hendidura sináptica y estas moléculas de acetilcolina se unen a receptores específicos, que son proteínas integrantes de la membrana de la fibra muscular. La unión a estos receptores permite la apertura de un canal por el que pasan cationes, de los que el más importante es el sodio.

Los cambios resultantes del potencial de membrana en reposo desencadenan un potencial de acción muscular que viaja a lo largo de la membrana de la célula muscular y que inicia los acontecimientos que llevan a la contracción muscular.

En la mayoría de las fibras musculares esqueléticas sólo existe una unión neuromuscular para cada fibra muscular, situada cerca del punto medio de la misma. El potencial de acción muscular se propaga desde el centro de la fibra hacia ambos extremos. Esta disposición permite la contracción simultánea de todas las partes de la fibra.



## Anatomía microscópica del músculo

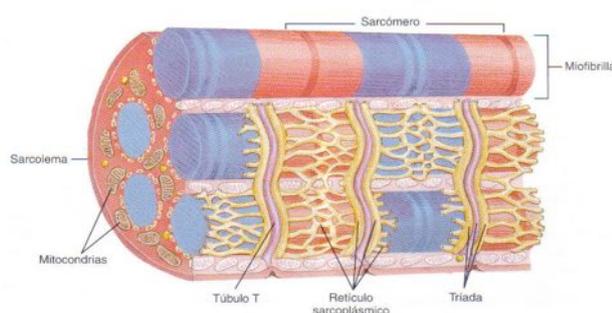
---

El estudio microscópico del músculo esquelético muestra miles de células cilíndricas muy largas llamadas **fibras musculares**. Éstas se disponen en paralelo unas a otras y tienen un diámetro que oscila entre 10 y 100 micras. Aunque la longitud más frecuente es de 100 micras, algunas pueden alcanzar una longitud de hasta 30 cm.

El **sarcolema** es la membrana plasmática que rodea al citoplasma de la fibra muscular, llamado **sarcoplasma**.

Cada célula presenta muchos núcleos dispuestos en la periferia celular, próximos al sarcolema.

Las mitocondrias se disponen en filas por toda la fibra muscular, en una situación estratégica cercana a las proteínas musculares que utilizan ATP para llevar a cabo el proceso de la contracción.



A gran aumento el sarcoplasma aparece repleto de pequeñas estructuras filiformes denominadas **miofibrillas**. Éstas son los elementos contráctiles del músculo esquelético. Tienen un diámetro de 1 a 2 micras y contienen dos tipos de filamentos:

**Filamentos finos:** de 8 nm.

**Filamentos gruesos:** de 16 nm.

Los filamentos finos y gruesos se superponen entre ellos en mayor o menor medida, dependiendo de si la fibra está contraída o relajada. El patrón de esta superposición produce las estriaciones transversales que pueden verse tanto en una sola miofibrilla como en la totalidad de la fibra muscular.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

Los filamentos del interior de la miofibrilla están dispuestos en compartimientos denominados **sarcómeros**.

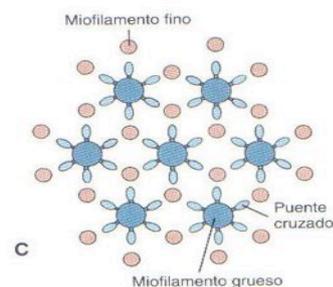
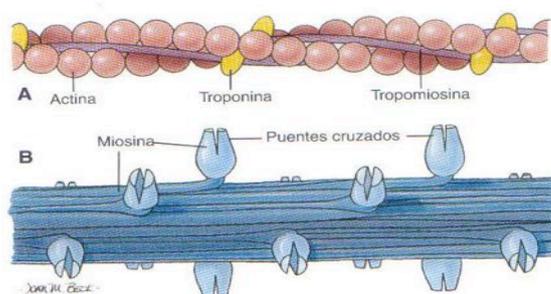
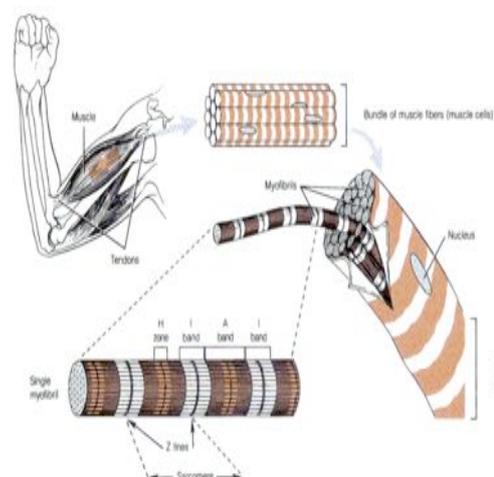
Las dos principales proteínas contráctiles del músculo son la miosina y la actina.

La **miosina** forma parte de los **filamentos gruesos**. Cada molécula de miosina tiene una forma parecida a dos palos de golf enrollados, con las colas apuntando al centro de la sarcómera. Estas dos colas están formadas por 6 cadenas polipeptídicas (2 pesadas y 4 ligeras). Las cabezas de miosina (parte globular) se denominan puentes transversales y se proyectan hacia fuera en dirección a los filamentos finos.

La **actina** es una proteína globular en forma de polímero alargado helicoidal. Forma parte de los **filamentos finos** junto a otras proteínas: troponina y tropomiosina.

En cada molécula de actina existe un lugar de unión con la miosina, en el que puede unirse un puente transversal. En el músculo relajado, la tropomiosina cubre los lugares de unión de la miosina existentes en la actina, bloqueando de esta forma la unión de los puentes transversales a la molécula de actina.

Cada miofibrilla está rodeada de un sistema de cisternas llenas de líquido llamado **retículo sarcoplásmico**. En la fibra muscular relajada el retículo sarcoplásmico almacena calcio. La liberación de calcio desde el retículo sarcoplásmico al sarcoplasma que rodea a los filamentos gruesos y finos desencadena la contracción muscular. Los



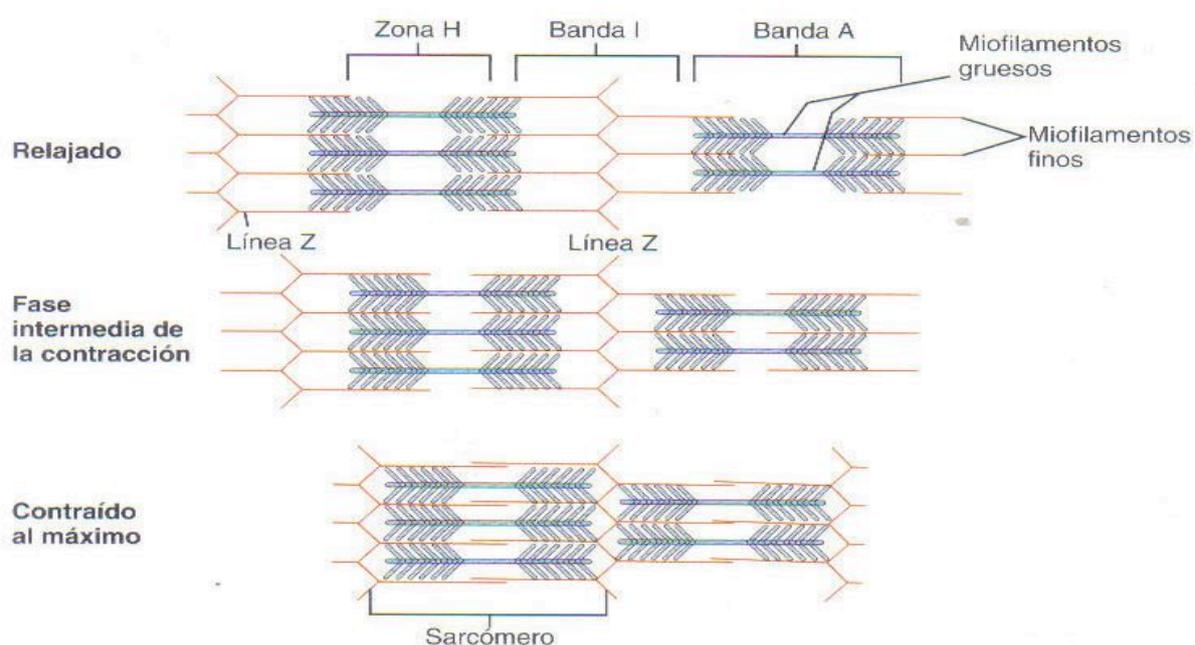
## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

iones de calcio pasan a través de poros especiales del retículo sarcoplásmico llamados canales de liberación del calcio.

Durante la contracción muscular los puentes transversales de la miosina tiran de los filamentos finos haciendo que se deslicen hacia dentro en dirección a la zona H.

Cuando los puentes transversales tiran de los filamentos finos, éstos acaban por encontrarse en el centro de la sarcómera. Los puentes transversales de la miosina pueden tirar aún de los filamentos finos de cada sarcómera, haciendo que sus extremos se superpongan.

A medida que los filamentos finos van deslizándose hacia dentro, los discos Z van aproximándose entre ellos y la sarcómera se acorta, pero la longitud de los filamentos finos y gruesos no cambia.



El deslizamiento de los filamentos y el acortamiento de las sarcómeras determina el acortamiento de la totalidad de la fibra muscular y, en último término, de todo el músculo.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

El inicio del deslizamiento se debe a un aumento de la concentración de calcio en el sarcoplasma, mientras que un descenso de dicha concentración interrumpe el proceso de deslizamiento.

Cuando una fibra muscular está relajada la concentración de calcio en el sarcoplasma es baja. Ello se debe a que la membrana

del retículo sarcoplásmico contiene bombas para el transporte activo de calcio, que lo eliminan del sarcoplasma. El calcio queda almacenado en el retículo sarcoplásmico hasta que cuando llega un potencial de acción se abren los canales de liberación del calcio, con lo cual estos iones salen del retículo sarcoplásmico inundando el sarcoplasma situado alrededor de los filamentos finos y gruesos.

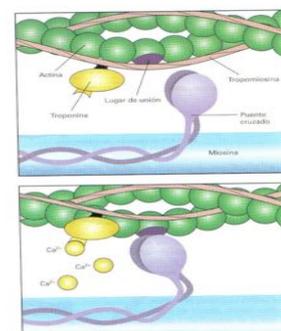
Estos iones calcio se combinan con la troponina haciendo que cambie de forma, lo que hace que el complejo troponina-tropomiosina se separe de los lugares de unión a la miosina que posee la actina.

La contracción muscular requiere la presencia de calcio. Pero también necesita energía en forma de ATP.

El ATP llega a los lugares de unión del ATP existentes en los puentes transversales (cabezas) de la miosina. Una porción de cada cabeza de miosina actúa como una ATPasa, enzima que divide el ATP en ADP + P mediante una reacción de hidrólisis. Esta reacción transfiere energía desde el ATP a la cabeza de miosina, incluso antes de que se inicie la contracción.

Los puentes transversales de la miosina se encuentran activados cuando se ha producido la hidrólisis del ATP.

Cuando el nivel de calcio se eleva, se une a la troponina, la cual cosa permite el deslizamiento de la tropomiosina, con lo que quedan al descubierto los lugares de unión de la miosina que existen en la actina. La miosina se une a la actina y se libera  $P_i$ .

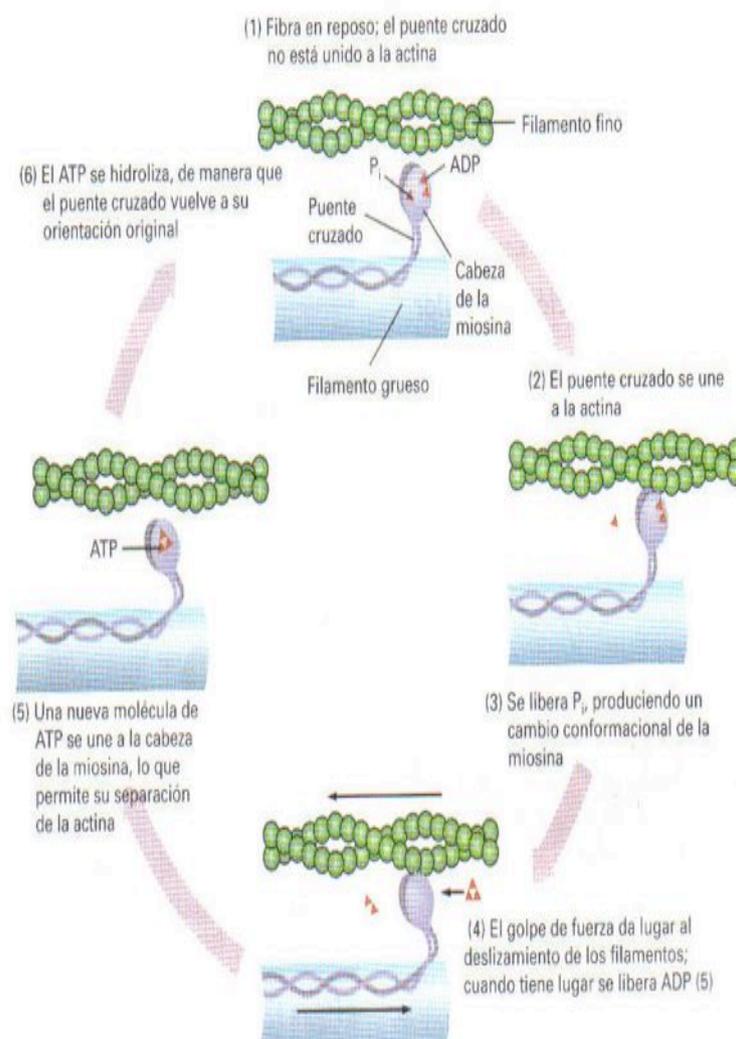


## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

Se produce un cambio de forma en la miosina cuando se une a la actina, lo cual genera el golpe de potencia de la contracción. Entonces las cabezas de miosina van girando a medida que van liberando ADP.

Una vez completado el golpe de potencia, el ATP se combina nuevamente con los puentes transversales de la miosina. Cuando se produce esta unión, las cabezas de miosina se separan de la actina. De nuevo se produce la degradación del ATP, lo que proporciona energía a la cabeza de miosina, que recupera su posición recta original.

El ciclo se repite una y otra vez. Los puentes transversales de miosina se mantienen en movimiento, hacia atrás y adelante con cada golpe de potencia, desplazando a los filamentos finos hacia la zona H.



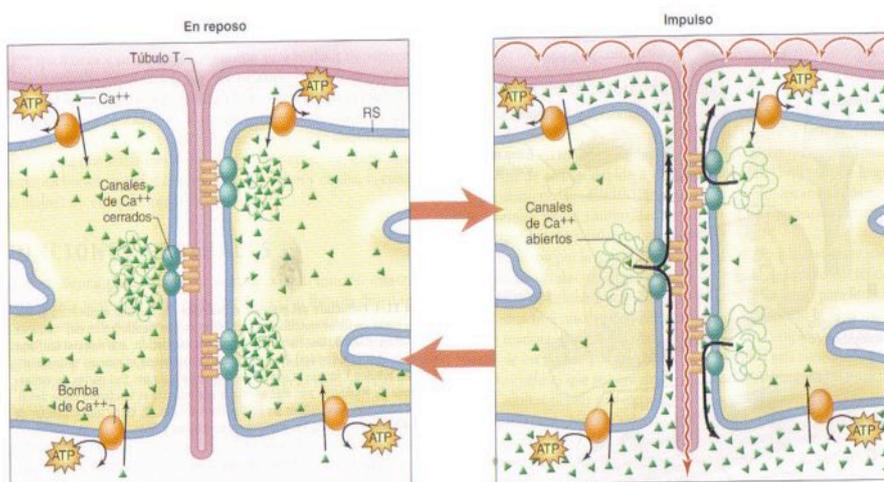
## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

La contracción es algo análogo a correr sobre una cinta sin fin no motorizada. Un pie (cabeza de miosina) choca con la cinta (filamento fino) y lo empuja hacia atrás (hacia la zona H). A continuación, el otro pie baja y da un segundo empujón. Pronto la cinta se mueve suavemente, mientras que el corredor (filamento grueso) siempre permanece en el mismo sitio.

Después de la contracción, dos cambios permiten que la fibra muscular vuelva a relajarse:

- En primer lugar, la acetilcolina es rápidamente degradada por una enzima denominada acetilcolinesterasa, la cual se encuentra en la hendidura sináptica. Cuando los potenciales de acción cesan en la neurona motora, no se libera más acetilcolina, con lo que la acetilcolinesterasa degrada con mayor rapidez la acetilcolina existente en la hendidura sináptica. Con ello se detiene la generación de potenciales de acción muscular y los canales de liberación del calcio del retículo sarcoplásmico se cierran.
- En segundo lugar, las bombas de transporte activo de calcio eliminan con rapidez el calcio existente en el sarcoplasma pasándolo al interior del retículo sarcoplásmico.

Cuando el nivel de calcio cae en el sarcoplasma, el complejo troponina-tropomiosina vuelve a deslizarse sobre los lugares de unión de la miosina existentes en la actina, lo que impide que los puentes transversales de la miosina se unan a la actina, de forma que los filamentos finos recuperan su posición relajada.



## Metabolismo muscular

---

La contracción del músculo requiere energía, pero la cantidad de ATP existente en el interior de las fibras musculares es sorprendentemente escasa; sólo hay la justa para mantener la contracción durante unos pocos segundos.

A diferencia de la mayoría de las células del organismo, las fibras musculares esqueléticas funcionan en forma de “todo o nada”, pasando de una inacción virtual a una gran actividad. Si se mantiene un ejercicio extenuante durante más de algunos segundos es necesario producir de nuevo ATP.

Este ATP se puede producir a través de tres vías o sistemas:

**Sistema del fosfágeno.**

**Sistema glucógeno-ácido láctico.**

**Sistema aeróbico.**

### Sistema del fosfágeno

Las fibras musculares poseen una molécula denominada **creatina fosfato (fosfocreatina)**, la cual puede transferir sus grupos fosfato al ADP, generando ATP + creatina.

La fosfocreatina y el ATP que forma constituyen el sistema fosfágeno, que proporciona energía suficiente para que los músculos se contraigan al máximo durante unos 15 segundos. Este es el sistema de energía que utilizan los músculos para gastos máximos pero breves de energía; por ejemplo la carrera de 100 metros lisos.



### Sistema glucógeno-ácido láctico

Cuando la actividad muscular ha de continuar, es decir se precisa más energía y ya se ha consumido la creatina fosfato, se cataboliza la glucosa para generar ATP., a partir de la degradación del glucógeno existente en el interior de las fibras musculares.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

El proceso de degradación del glucógeno se denomina **glucogenolisis**, el cual da lugar a moléculas de glucosa. Éstas se degradan mediante **glucólisis**, dando lugar a **ácido pirúvico y ATP**. Como la glucólisis no requiere oxígeno se trata de un proceso **anaeróbico**.

Además, el ácido pirúvico entra en las mitocondrias y es oxidado para producir gran cantidad de ATP a partir del ADP. No obstante, durante algunas actividades no existe oxígeno suficiente para degradar por completo el ácido pirúvico, con lo cual éste se transforma en ácido láctico.

Alrededor del 80% del ácido láctico producido de esta forma difunde del músculo a la sangre; entonces las fibras musculares cardíacas, las células renales y las hepáticas son capaces de utilizar dicho ácido láctico para producir ATP.

Y aún hay más, las células hepáticas pueden convertir de nuevo una cierta cantidad de ácido láctico en glucosa, lo cual lleva a dos beneficios: Proporciona nuevas moléculas de glucosa que pueden ser reutilizadas para formar más ATP y reduce la acidez que produce el ácido láctico, con lo cual se puede retrasar la fatiga muscular.

Este sistema glucógeno-ácido láctico puede proporcionar la energía suficiente para unos 30-40 segundos de máxima actividad muscular.

## Sistema aeróbico

Cuando la actividad muscular dura más de medio minuto depende cada vez más de un proceso aeróbico, es decir de una reacción que precisa oxígeno.

Si la cantidad de oxígeno presente es suficiente, las enzimas mitocondriales pueden oxigenar por completo el ácido pirúvico a anhídrido carbónico, agua, ATP y calor.



# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

Aunque más lento que la glucólisis, este sistema aporta más energía, alrededor de 36 moléculas de ATP por cada molécula de glucosa.

El tejido muscular dispone de dos fuentes de oxígeno: El oxígeno que difunde hacia las fibras musculares procedente de la sangre y el oxígeno liberado por la mioglobina en el interior de las células musculares.

El sistema aeróbico proporciona ATP suficiente para una actividad prolongada en tanto existan oxígeno y elementos nutritivos en cantidades adecuadas. Junto a la glucosa estos elementos nutritivos son los ácidos grasos (procedentes de la degradación de los triglicéridos de las células adiposas) y los aminoácidos (procedentes de la degradación de las proteínas).

En las actividades que duran más de 10 minutos, el sistema aeróbico proporciona más del 90% del ATP necesario. En situaciones de larga duración, por ejemplo una maratón, casi el 100% del ATP se produce en el proceso aeróbico.

## **Tensión muscular**

---

Un solo potencial de acción en una neurona motora determina una sola contracción en todas las fibras musculares de su unidad motora. Se dice que la contracción sigue la regla de “todo o nada”, porque cada una de las fibras musculares se contrae todo lo posible.

Sin embargo, un músculo en su conjunto puede hacer contracciones de distintos grados con objeto de realizar tareas diferentes. Por ejemplo, los músculos del brazo no se contraen con la misma amplitud cuando se quiere levantar un libro que cuando se maneja una hoja de papel.

La cantidad de tensión que el músculo esquelético puede desarrollar depende de la frecuencia de la estimulación de las fibras musculares por las neuronas motoras, de la longitud de las fibras musculares antes de contraerse, del número de fibras que se contraen y de los componentes estructurales del propio músculo.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

## Contracciones isotónicas e isométricas

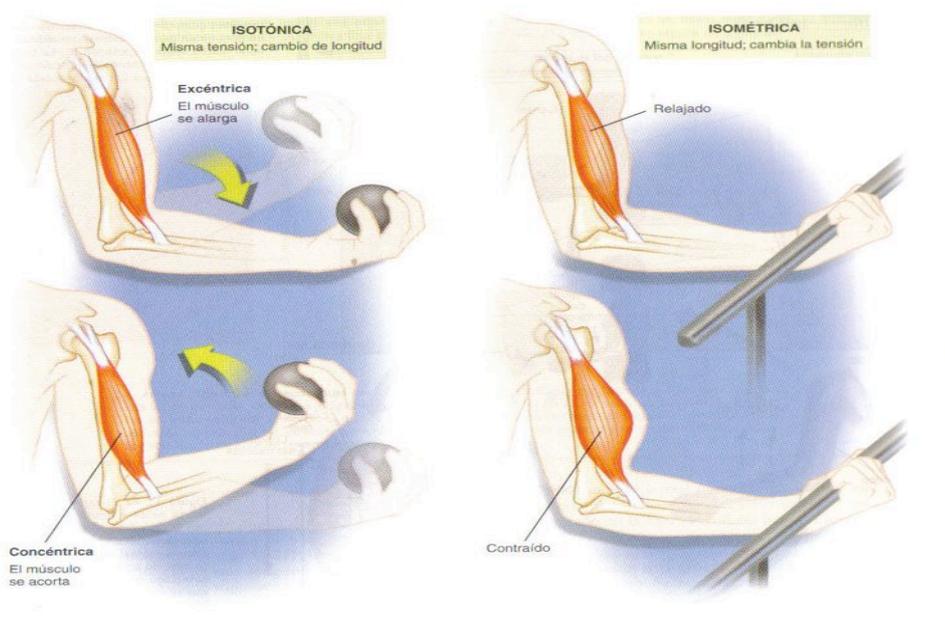
Las **contracciones isotónicas** se producen cuando se mueve una carga constante a lo largo de todas las posiciones posibles en una articulación. En este tipo de contracciones la tensión permanece constante.

Existen dos tipos de contracciones isotónicas:

**Concéntricas:** El músculo se acorta y tracciona otra estructura, como un hueso, para poder producir un movimiento y reducir el ángulo de la articulación. El levantamiento de un libro implica contracciones concéntricas del músculo bíceps del brazo.

**Excéntricas:** El músculo aumenta su longitud global durante la contracción. Al volver a dejar el libro sobre una mesa, el bíceps previamente acortado aumenta de longitud gradualmente aunque mantiene la contracción.

Las **contracciones isométricas** son aquellas en las que el músculo no se acorta a pesar de que la tensión muscular aumenta mucho. Un ejemplo podría ser el mantener un libro en una posición permanente.

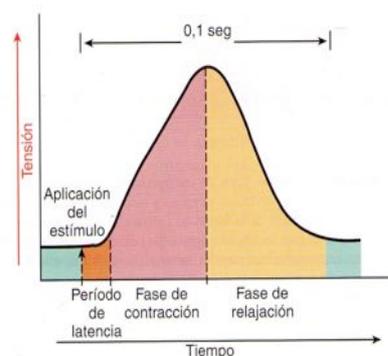


## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

Los ejercicios habituales de aeróbic que suponen muchas contracciones isotónicas aumentan la irrigación de los músculos esqueléticos y, por tanto, mejoran el riego sanguíneo. Las actividades que incluyen muchas contracciones isométricas (levantamiento de pesas) se basan más en la producción anaeróbica de ATP. Estas actividades también estimulan la síntesis de proteínas musculares y, como consecuencia, después de un cierto tiempo, se produce un aumento del tamaño de los músculos (hipertrofia muscular).

El entrenamiento aeróbico aporta resistencia para actividades prolongadas, mientras que el entrenamiento anaeróbico desarrolla la fuerza muscular para acciones de corta duración. El entrenamiento de intervalos es un régimen de ejercicios que incorpora ambos tipos de actividades, por ejemplo, alterna las carreras cortas y rápidas (sprints; actividad anaeróbica) con las carreras lentas y largas (footing; actividad aeróbica).

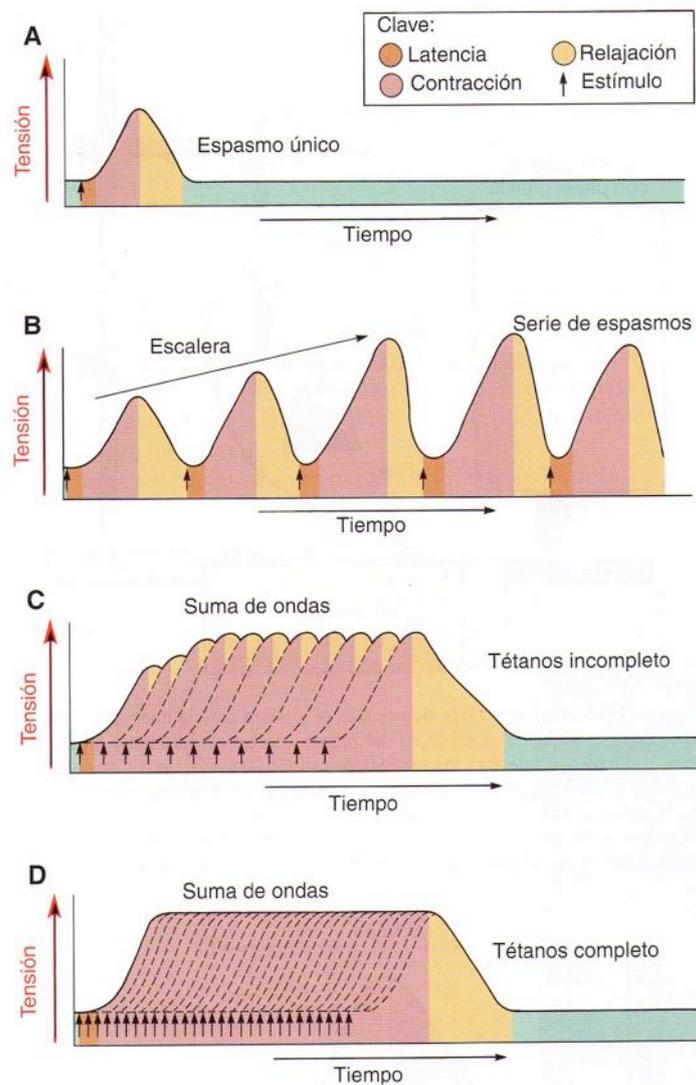
Cuando una fibra muscular recibe una estimulación suficiente para contraerse, pierde temporalmente su excitabilidad y no reaccionará de nuevo mientras no recupere la capacidad de respuesta. Este período de pérdida de excitabilidad recibe el nombre de **período refractario**, característico tanto de las células nerviosas como de las musculares. Este período refractario comprende tanto la fase de contracción como de relajación de la siguiente ilustración que hace referencia a una contracción muscular.



Durante el período de latencia, el impulso iniciado por la estimulación se desplaza a través del sarcolema y de los túbulos hasta el retículo sarcoplásmico, donde provoca la liberación de iones de calcio al sarcoplasma. La contracción no aparece hasta que el calcio se une a la troponina y comienza el deslizamiento de los miofilamentos. Después de algunos milisegundos, cesa el deslizamiento de éstos y empieza la relajación. Al finalizar la fase de relajación, las reacciones miosina-actina de todas las fibras han finalizado.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

Este sería el resultado de una contracción espasmódica de una fibra muscular. Pero en nuestro cuerpo no se suelen producir estas contracciones espasmódicas. La contracción del músculo es más suave gracias a la acción de nuestro sistema nervioso que recluta gradualmente fibras musculares a medida que va aumentando la fuerza de contracción del músculo.



**Figura 11-19 Miografías de varios tipos de contracciones musculares.** **A**, Contracción espasmódica única. **B**, El fenómeno «treppen» o «efecto de la escalera» consiste en un incremento escalonado de la fuerza de contracción en los primeros espasmos de una serie. **C**, El tétanos incompleto tiene lugar cuando una rápida sucesión de estímulos produce «espasmos» que parecen sumarse (sumación de ondas), produciendo una contracción bastante sostenida. **D**, El tétano completo es una contracción más leve, mantenida, producida por la suma de «contracciones espasmódicas» que se producen con tanta proximidad que impiden que el músculo se relaje.

## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

En estudios miográficos de la contracción muscular se observa un efecto denominado **“treppe”** o **“fenómeno de la escalera”**. Consiste en un aumento gradual de la fuerza de contracción que se puede observar en una serie de contracciones espasmódicas que tienen lugar con el intervalo de 1 segundo. Un músculo se contrae más enérgicamente después de haberse contraído previamente varias veces, principio utilizado por los deportistas para el calentamiento. En esta situación, las fibras musculares calientes permiten una difusión de los iones calcio hacia el sarcoplasma de forma más eficiente.

Por tanto, hasta un determinado punto las fibras musculares calientes se contraen con más potencia que las frías. Tras unos pocos estímulos iniciales, el músculo responde a estímulos sucesivos con contracciones máximas, pero al final responde con contracciones cada vez menos potentes, ya que si estimulamos repetidamente al músculo, la fase de relajación se hace cada vez más corta acabando por desaparecer por completo. Es decir, el músculo se queda entonces contraído en una situación anómala de contracción prolongada denominada **contractura** o **tetania**.



Los músculos esqueléticos tienen un período refractario corto, de alrededor 5 mseg, por eso estos músculos pueden entrar en tetania si los estimulamos repetidamente. En cambio el músculo cardíaco tiene un período refractario largo, de aproximadamente 300 mseg, lo cual permite que éste lata a elevadas frecuencias sin que se produzca una contractura, lo cual sería fatal para el organismo.

## Tipos de fibras musculares

---

Las fibras musculares esqueléticas se contraen y relajan a diferentes velocidades. Esto depende de la velocidad con que degrade el ATP. Las fibras de contracción rápida lo hacen con mucha mayor rapidez. Además, las reacciones metabólicas que utilizan las fibras musculares esqueléticas para generar ATP son también variables, con lo cual es distinta la rapidez con que se fatigan.

Teniendo en cuenta esto, podemos dividir las fibras musculares esqueléticas en:

### **Fibras oxidativas lentas (Tipo I).**

- ✓ Son de contracción lenta y resistentes a la fatiga.
- ✓ Contienen grandes cantidades de mioglobina, muchas mitocondrias y muchos capilares sanguíneos. Son **fibras rojas**.
- ✓ Tienen gran capacidad de generar ATP a través de sistema aeróbico.
- ✓ Degradan a baja velocidad el ATP, con lo que su contracción es lenta.
- ✓ Son muy resistentes a la fatiga.
- ✓ Ej: Músculos del cuello que mantienen erguida la cabeza.

Las fibras oxidativas tipo I se denominan fibras lentas porque sus filamentos están formados por una clase de miosina (tipo I) que reacciona lentamente. Al contraerse tan despacio, suelen producir ATP lo bastante deprisa como para ir al ritmo de las necesidades energéticas de la miosina, evitando así la fatiga.

### **Fibras oxidativas intermedias (Tipo IIA).**

- ✓ Son de contracción rápida y resistentes a la fatiga.
- ✓ Contienen grandes cantidades de mioglobina, mitocondrias y capilares sanguíneos. Por tanto, son también **fibras rojas**.

## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

- ✓ Tienen gran capacidad para generar ATP mediante procesos oxidativos, es decir, aeróbicos.
- ✓ Este ATP lo degradan a gran velocidad, con lo que su contracción es rápida.
- ✓ Son muy resistentes a la fatiga, pero no tanto como las oxidativas lentas.
- ✓ Ej: Musculatura piernas, especialmente en corredores.

Este tipo de fibras son de contracción rápida, pero no tan rápida como las glucolíticas, por eso algunos autores las consideran como fibras intermedias. Son más resistentes a la fatiga que las fibras rápidas y pueden producir más fuerza y más deprisa que las lentas.

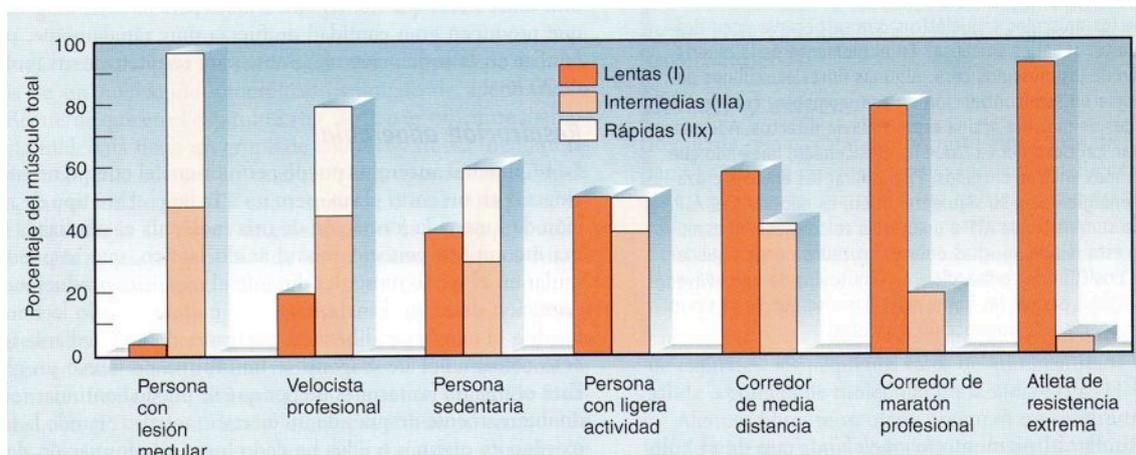
### **Fibras glucolíticas rápidas (Tipo IIx).**

- ✓ Son fibras de contracción rápida, fatigables.
- ✓ Tienen bajo contenido en mioglobina, mitocondrias y también en capilares sanguíneos, sin embargo contienen grandes cantidades de glucógeno. Son **fibras blancas**.
- ✓ Están obligadas a generar el ATP mediante procesos anaeróbicos, que no pueden suministrar grandes cantidades de manera continuada.
- ✓ Degradan el ATP a gran velocidad, por lo que su contracción es potente y rápida.
- ✓ Ej: Los músculos del brazo tienen muchas fibras de este tipo.

Estas fibras glucolíticas rápidas son las verdaderamente rápidas pues contienen un tipo de miosina (tipo II) que se contrae más rápidamente que la miosina tipo I y, además, su sistema sarcoplásmico es más eficaz para liberar calcio al sarcoplasma. La consecuencia de esta rápida contracción es la rápida depleción del ATP, por eso son fibras más fatigables que las oxidativas.

Casi todos los músculos esqueléticos del organismo están formados por una mezcla de los tres tipos de fibras musculares esqueléticas, pero las proporciones varían dependiendo de la actividad habitual del músculo.

## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR



Aunque los músculos esqueléticos están formados por una mezcla de los tres tipos de fibras, las de cada una de las unidades motoras son todas del mismo tipo. Por ejemplo, si para realizar una tarea sólo se requiere una contracción débil, las únicas unidades motoras que se activan son las oxidativas lentas; si se necesita una contracción más potente se reclutan las fibras glucolíticas rápidas, y si se requiere una contracción máxima, también entran en acción las unidades motoras formadas por fibras oxidativas rápidas. El sistema nervioso central es el encargado de determinar la activación de las distintas unidades motoras.

El número total de fibras musculares no suele cambiar, pero las características de las existentes se pueden modificar. Así, varios ejercicios pueden inducir cambios en las fibras del músculo esquelético:

- ✓ Los ejercicios de resistencia (carrera o natación) producen transformación gradual de algunas fibras glucolíticas (IIx) rápidas en oxidativas intermedias (IIA).
- ✓ Los ejercicios que requieren gran fuerza durante períodos cortos de tiempo (halterofilia, sprinters), producen un aumento del tamaño y potencia de las fibras glucolíticas rápidas (IIx).

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

Estos aumentos de tamaño se deben a un incremento de la síntesis de filamentos finos y gruesos, cuyo resultado global será el aumento de los músculos.

## Atrofia e hipertrofia muscular

- ✓ **Atrofia** es la disminución del tamaño de los músculos, que se debe a la pérdida progresiva de miofibrillas.

**Atrofia por desuso:** Los músculos se atrofian al no utilizarlos. Es típico de las personas encamadas por diversas patologías. Los impulsos nerviosos que llegan al músculo inactivo se van reduciendo progresivamente.

**Atrofia por denervación:** Es debida a la interrupción de la inervación del músculo. En un plazo de 6 meses a 2 años el músculo tendrá sólo una cuarta parte de su tamaño original y las fibras musculares habrán sido sustituidas por tejido fibroso. La transición a tejido fibroso, cuando se completa, es irreversible.

- ✓ **Hipertrofia** es el aumento del tamaño muscular debido a la producción de nuevas miofibrillas, mitocondrias, retículo sarcoplásmico, etc. Se produce como consecuencia de una actividad muscular muy potente y repetida, por ejemplo, levantamiento de pesas. Estos músculos hipertrofiados pueden efectuar contracciones más potentes. Existen dos tipos de hipertrofias:
  - **Sarcoplásmica:** Consiste en el aumento del tamaño de la fibra muscular, con igual número de miofibrillas. Es la hipertrofia de los fisiculturistas, más estética pero con menos fuerza.
  - **Miofibrilar:** Consiste en el aumento del tamaño de la fibra muscular por aumento del número de miofibrillas. Es la

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

hipertrófia de los halterofilas, menos estética pero con más fuerza.

Los varones presentan un mayor aumento del tamaño de las fibras musculares debido a la hormona testosterona, producida por los testículos. Los esteroides anabolizantes son lípidos derivados del colesterol, similares a la testosterona y que aumentan el tamaño muscular, por lo cual también aumentan la potencia y la resistencia. Pero tienen efectos indeseables suficientemente dañinos para que su uso sea proscrito: cáncer hepático, lesiones renales y mayor riesgo de enfermedades cardíacas, interrupción del crecimiento en personas jóvenes, irritabilidad y conducta agresiva, esterilidad, etc.

## Control nervioso de los músculos esqueléticos

---

La inervación de la musculatura esquelética es:

- ✓ Sensitiva: Llevada a cabo por neuronas sensitivas que nacen de los receptores musculares:

Huso muscular.

Órgano tendinoso de Golgi.

- ✓ Motora: Llevada a cabo por la motoneurona inferior:

Motoneurona alfa.

Monotneurona gamma.

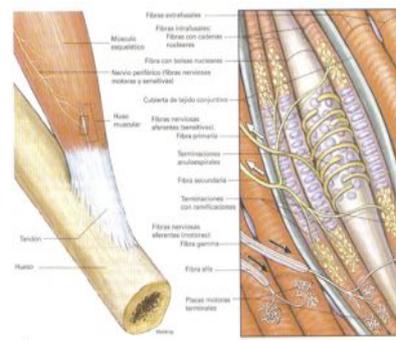
# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

## Aparato del huso muscular

Proporciona información al sistema nervioso central sobre la longitud del músculo. Se trata de un grupo de fibras musculares rodeadas de tejido conjuntivo. Estas fibras se denominan intrafusales y se caracterizan porque:

- ✓ Carecen de miofibrillas en la parte central.
- ✓ Esta zona central está compuesta por núcleos en disposición en bolsas o en cadenas.
- ✓ Se disponen en paralelo con las fibras extrafusales y se insertan en los tendones existentes en cada extremo del músculo.
- ✓ Los músculos que requieren un grado más fino de control, como los músculos de la mano, son los que tienen una mayor densidad de husos.
- ✓ Están inervadas por dos tipos de neuronas sensitivas:
  - Terminaciones sensitivas primarias o anuloespinales, que se disponen alrededor de las regiones centrales de fibras con bolsas de núcleos.
  - Terminaciones sensitivas secundarias o ramificadas, que se encuentran en los polos de contracción de las fibras con cadenas nucleares.
- ✓ Están inervadas por un tipo de neurona motora; la motoneurona gamma. La motoneurona alfa, con velocidad de conducción mayor, inerva las fibras extrafusales.

Debido a que los husos se disponen en paralelo con las fibras musculares extrafusales, el estiramiento de un músculo hace que sus husos también se estiren. De esta manera se estimulan las terminaciones sensitivas primarias y secundarias. Por tanto, el aparato del huso actúa como un detector de longitud.



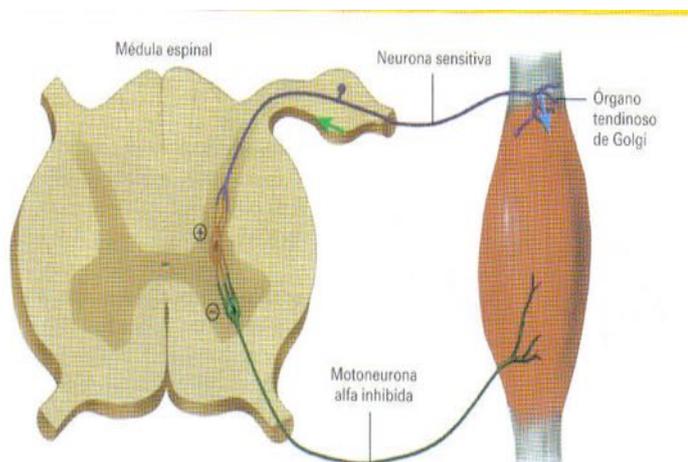
# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

## Órganos tendinosos de Golgi

Son receptores sensitivos situados en los tendones de los músculos esqueléticos. Controlan de manera continua la tensión existente en los tendones debido a la contracción muscular o al estiramiento pasivo del músculo.

Las neuronas sensitivas de estos receptores establecen sinapsis con las interneuronas de la médula espinal; a su vez, estas interneuronas hacen sinapsis inhibitorias con las neuronas motoras que inervan el músculo. Este reflejo inhibitorio del órgano tendinoso de Golgi se denomina reflejo disináptico y es útil para impedir la contracción o estiramiento pasivos excesivos del músculo.

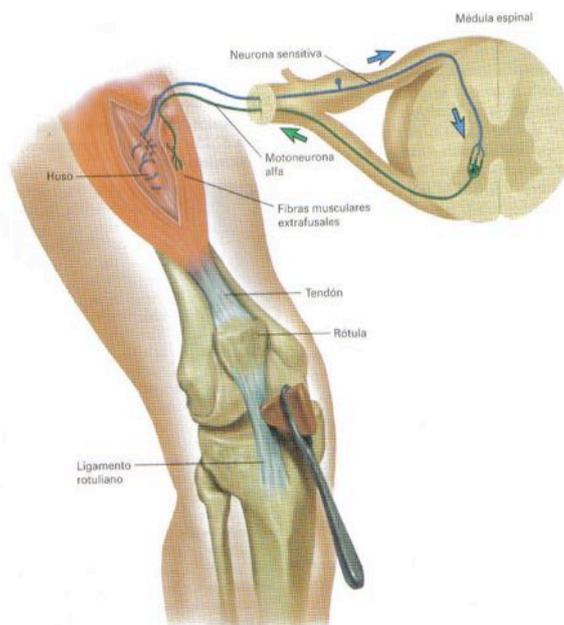


Aunque los músculos esqueléticos se suelen denominar músculos voluntarios debido a que están controlados por las vías motoras descendentes que permanecen bajo control consciente, con frecuencia se contraen de manera refleja e inconsciente en respuesta a estímulos concretos. En el tipo más sencillo de reflejo, el músculo se contrae en respuesta al estímulo del estiramiento muscular. Los reflejos más complejos implican la inhibición de los músculos antagonistas y la regulación de diversos músculos en los dos lados del cuerpo.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

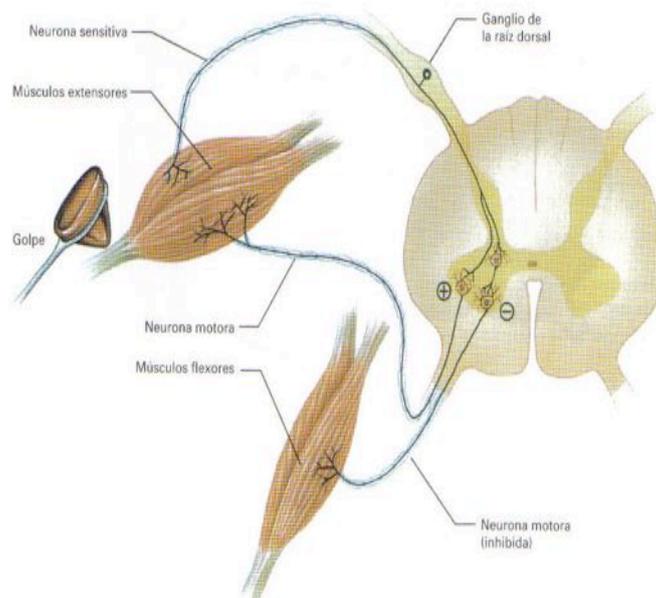
El arco reflejo corresponde a la vía que sigue el impulso nervioso en el reflejo desde las terminaciones sensitivas hasta las terminaciones motoras, implicando a sólo unas pocas sinapsis en el SNC.

**Reflejo monosináptico de estiramiento.** Sólo implica la participación de una sinapsis en el SNC. La neurona sensitiva establece directamente sinapsis con la neurona motora, sin la participación de las interneuronas en la médula espinal. Este reflejo está presente en todos los músculos, pero es más llamativo en los músculos extensores de los miembros. El provocado con mayor frecuencia es el rotuliano.



**Reflejo disináptico.** Es el reflejo inhibitorio del órgano tendinoso de Golgi, ya descrito anteriormente.

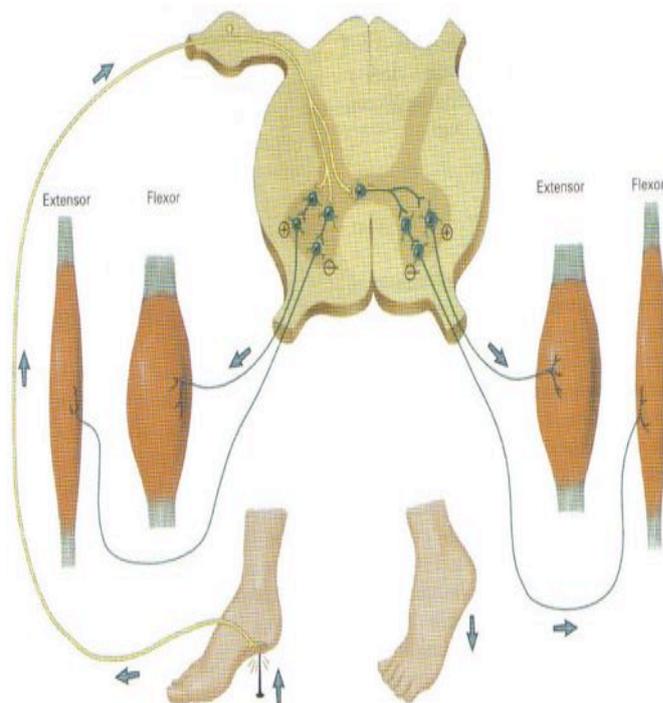
**Reflejo de inervación recíproca.** Consiste en la inhibición de la musculatura antagonista, cuando se produce un reflejo monosináptico de estiramiento.



# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

**Reflejo de inervación recíproca doble.** El reflejo de estiramiento con sus inervaciones recíprocas sólo afecta a los músculos de un miembro y está controlado únicamente por un segmento de la médula espinal. Los reflejos más complejos implican los músculos controlados por numerosos segmentos de la médula espinal y afectan también a músculos del lado contralateral de la médula. La inervación recíproca doble queda ilustrada en el reflejo extensor cruzado.



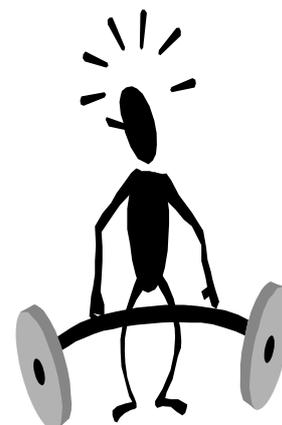
## Fatiga muscular

---

Es la imposibilidad de mantener una tensión muscular dada cuando el músculo permanece en contracción sostenida, o para reproducir una tensión particular durante la contracción rítmica a lo largo del tiempo.



La fatiga durante el ejercicio moderado tiene lugar cuando las fibras de contracción lenta agotan su reserva de glucógeno y cuando se realiza el reclutamiento progresivo de las fibras de contracción rápida. Éstas obtienen su energía a través de la respiración anaerobia, al convertir la glucosa en ácido láctico, lo que da lugar a una disminución del pH intramuscular que facilita la aparición de la fatiga.



# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

Parece ser que la disminución del pH dificulta la captación por parte del retículo sarcoplásmico de  $\text{Ca}^{2+}$ , con lo que éste no se libera al sarcoplasma en respuesta a la estimulación y se detiene el mecanismo de la contracción.

## Tejido muscular cardíaco

---

Es el tejido fundamental de la pared del corazón. Al igual que el músculo esquelético es estriado y contiene sarcómeros que se acortan debido al deslizamiento de los filamentos finos y gruesos. Sin embargo, mientras que el músculo esquelético requiere la estimulación nerviosa para contraerse, el músculo cardíaco puede producir impulsos y contraerse espontáneamente.

### Anatomía

Las fibras de tejido muscular cardíaco son aproximadamente cuadrangulares y tienen un diámetro de unos 14 micras, con un solo núcleo de localización central.

Tejido muscular cardíaco



El sarcolema de las fibras musculares cardíacas es similar al del músculo esquelético, pero el sarcoplasma es más abundante y las mitocondrias son más mayores y numerosas. Las fibras musculares cardíacas tienen la misma disposición de actina y miosina y las mismas bandas, zonas y discos Z que las esqueléticas. Los túbulos transversales del músculo cardíaco son mayores y el retículo sarcoplásmico es más escaso que en el músculo esquelético.

Las fibras musculares cardíacas se ramifican y se comunican entre ellas formando dos redes distintas:

- ✓ Las paredes musculares y el tabique de las cavidades superiores del corazón (aurículas) forman una red.
- ✓ Las paredes musculares y el tabique de las cavidades inferiores del corazón (ventrículos) forman otra red.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

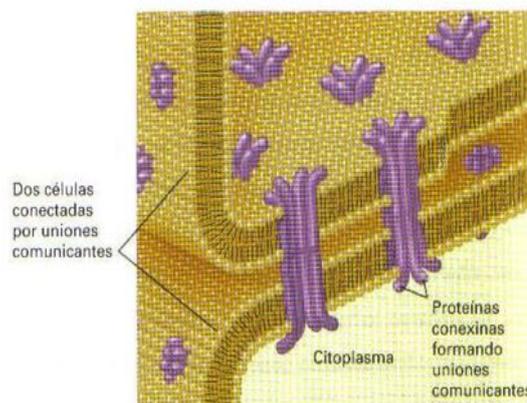
Cada red se contrae como una unidad funcional. Cuando las fibras de la aurícula se contraen como una unidad, la sangre pasa a los ventrículos. A continuación, cuando las fibras ventriculares se contraen como una unidad, la sangre es impulsada fuera del corazón hacia las arterias.

## Fisiología

En las fibras musculares cardíacas las mitocondrias son mayores y más numerosas que en las fibras musculares esqueléticas pues el músculo cardíaco depende en gran medida del sistema aeróbico para generar ATP.

El músculo cardíaco produce poco ATP por la vía anaeróbica del sistema glucógeno-ácido láctico. Además, las fibras musculares cardíacas pueden utilizar el ácido láctico producido por las fibras musculares esqueléticas para generar ATP, lo que supone una ventaja durante el ejercicio.

Otra diferencia entre ambos tejidos musculares estriados es que el músculo esquelético se contrae sólo cuando es estimulado por la acetilcolina liberada por un potencial de acción de una neurona motora. Por el contrario, el tejido muscular cardíaco puede contraerse sin estimulación extrínseca de origen nervioso u hormonal. Su estimulación proviene de una red conductora de fibras musculares cardíacas especializadas existentes en el interior del propio corazón. La transmisión del potencial de acción entre las células miocárdicas se realiza a través de unas **uniones comunicantes** entre estas células, unas proteínas denominadas **conexinas**.



# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

También es importante mencionar que en las fibras musculares cardíacas el calcio penetra en el sarcoplasma tanto desde el retículo sarcoplásmico como procedente del líquido extracelular, con lo cual se consigue una liberación prolongada de calcio hacia el sarcoplasma.

Además, el período refractario del tejido muscular cardíaco es más largo, de varias décimas de segundo, lo que posibilita que el corazón se relaje entre cada dos latidos. El largo período refractario permite que la frecuencia cardíaca aumente de forma significativa, pero impide que el corazón pueda sufrir una tetania, ya que si esto último fuera posible, cesaría el flujo de sangre.

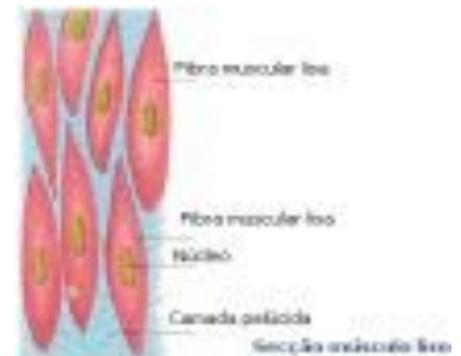
## Tejido muscular liso

---

El músculo liso no presenta sarcómeros sino que contiene actina y miosina que dan lugar a contracciones en respuesta a mecanismos reguladores específicos. Esta ausencia de sarcómeros es la que le confiere ese aspecto no estriado.

### Anatomía

Las fibras musculares lisas tienen un tamaño de 30 a 200 micras de longitud, siendo más gruesas en su parte central (3 a 8 micras). En cada fibra existe un solo núcleo oval de localización central.



***El sarcoplasma de las células musculares lisas contiene tanto filamentos gruesos como filamentos finos, pero éstos no se disponen ordenadamente en sarcómeros.***

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

En las fibras musculares lisas existen de 1º a 15 filamentos finos por cada filamento grueso (en las fibras musculares esqueléticas la relación es de 2:1). Las fibras musculares lisas tienen además filamentos intermedios que se unen a estructuras llamadas cuerpos densos, similares a los discos Z de las fibras musculares estriadas, los cuales se encuentran dispersos en el sarcoplasma o unidos al sarcolema.

Existen dos tipos de tejido muscular liso:

- ✓ **Tejido muscular liso visceral o de una sola unidad:** Es el tipo más abundante. Se encuentra formando capas envolventes que constituyen parte de las paredes de las pequeñas arterias y venas y de las vísceras huecas como el estómago, el intestino, el útero y la vejiga urinaria.
- ✓ **Tejido muscular liso de unidades múltiples:** Se encuentran en las paredes de las grandes arterias, en vías aéreas (bronquios y bronquiolos), en los músculos erectores de los pelos unidos a los folículos pilosos y en los músculos radiales y circulares del iris que ajustan el diámetro de las pupilas.

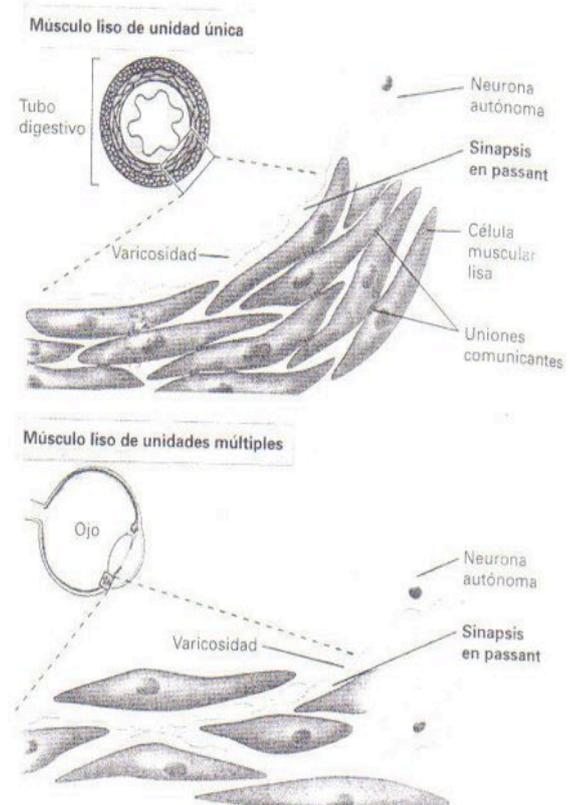


Figura 12.33. Músculo liso de unidad única y de unidades múltiples. En el músculo liso de unidad única, las células musculares lisas individuales están conectadas eléctricamente mediante las uniones comunicantes, de manera que las despolarizaciones pueden pasar de una célula a la siguiente. En el músculo liso de unidades múltiples cada célula muscular lisa debe ser estimulada por un axón. Los axones de las neuronas del sistema nervioso autónomo presentan varicosidades que liberan neurotransmisores y que forman sinapsis «de pasada» con las células musculares lisas.

# FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

---

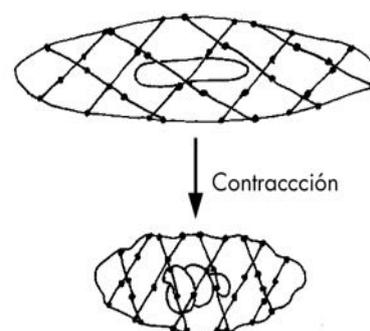
## Fisiología

En comparación con la contracción de una fibra estriada, la de una fibra muscular lisa comienza más lentamente y dura mucho más tiempo. Además, el músculo liso puede acortarse y distenderse en mayor medida que el músculo estriado.

La contracción del músculo liso, como la del estriado, se inicia con el aumento de la concentración del calcio en el sarcoplasma. El retículo sarcoplásmico (reservorio de calcio en el músculo estriado) es escaso en el músculo liso. Los iones de calcio llegan al sarcoplasma del músculo liso procedentes tanto del líquido extracelular como del retículo sarcoplásmico.

En el músculo liso la proteína reguladora que capta el calcio en el citosol es la **calmodulina** (en el músculo estriado realiza esa función la troponina). Tras unirse al calcio, la calmodulina activa una enzima llamada **cinasa de la cadena ligera de la miosina**, que utiliza ATP para fosforilar (añadir un fosfato) a una parte de la cabeza de la miosina. Una vez captado el fosfato, la cabeza de miosina puede unirse a la actina y desencadenar la contracción. La cinasa actúa con mayor lentitud, lo que contribuye a que la contracción del músculo liso sea menos rápida.

Durante la contracción, el mecanismo de deslizamiento de los filamentos gruesos y finos genera una tensión que se transmite a los filamentos intermedios. A su vez, éstos tiran de los cuerpos densos unidos al sarcolema, lo que da lugar a un acortamiento longitudinal de la fibra muscular.



## FISIOLOGÍA DEL SISTEMA MUSCULAR

**Cuadro 12.10. Comparación de los músculos esquelético, cardíaco y liso**

Músculo esquelético	Músculo cardíaco	Músculo liso
Estriado; la actina y la miosina se disponen en sarcómeros	Estriado; la actina y la miosina se disponen en sarcómeros	No estriado; mayor cantidad de actina que de miosina; la actina se inserta en los cuerpos densos y en la membrana celular
Reticulo sarcoplásmico y túbulos transversales bien desarrollados	Desarrollo intermedio del retículo sarcoplásmico y de los túbulos transversales	Desarrollo escaso del retículo sarcoplásmico; ausencia de túbulos transversales
Contiene troponina en los filamentos finos	Contiene troponina en los filamentos finos	Contiene calmodulina, una proteína que cuando se une al $Ca^{2+}$ activa la enzima quinasa de la cadena ligera de la miosina
El $Ca^{2+}$ se libera al citoplasma desde el retículo sarcoplásmico	El $Ca^{2+}$ entra al citoplasma desde el retículo sarcoplásmico y el líquido extracelular	El $Ca^{2+}$ entra al citoplasma procedente del líquido extracelular, el retículo sarcoplásmico y, quizá, las mitocondrias
No se puede contraer si no existe estimulación nerviosa; la deservación da lugar a atrofia muscular	Se puede contraer sin necesidad de estimulación nerviosa; los potenciales de acción se originan en las células marcapaso del corazón	Mantiene el tono en ausencia de estimulación nerviosa; el músculo liso visceral genera potenciales marcapasos; la deservación da lugar a hipersensibilidad frente a la estimulación
Las fibras musculares se estimulan de manera independiente; no existen uniones comunicantes	Existen uniones comunicantes en forma de discos intercalados	Suelen existir uniones comunicantes