

Artículo

LA CONTRACCIÓN MUSCULAR.

Resulta ampliamente conocida la participación de la musculatura esquelética en la realización de todos los movimientos del cuerpo humano. Los restantes tipos de músculos presentes en el organismo (liso y cardíaco) no intervienen directamente en las acciones motoras ya que su regulación no es voluntaria.

El movimiento, en condiciones normales, solo es posible cuando ocurre la contracción del músculo que genera una tracción sobre su punto de inserción. La eficiencia y coordinación de ese movimiento depende, por una parte, del número de unidades motoras que participan en la contracción y por otro, de cómo estas se incorporan a la actividad.

Las unidades motoras difieren tanto en su estructura como en sus características funcionales, lo que está determinado tanto por las dimensiones del cuerpo de la motoneurona como por el grosor de su axón y por el número de fibras musculares que integren la unidad motriz.

Resulta que mientras mayor sea el cuerpo de la motoneurona más grueso será su axón y mayor la cantidad de fibras musculares que inerva, lo que trae como consecuencia que cada músculo, según sus dimensiones, está integrado por unidades motrices grandes y pequeñas.

Independientemente de sus dimensiones cada músculo está integrado por centenares de fascículos y cada fascículo por centenares de fibras musculares. La fibra muscular es una célula de forma cilíndrica que se encuentra cubierta por una fina membrana elástica denominada sarcolema, cuya estructura es semejante a la de las fibras nerviosas. La membrana de las células musculares desempeña un importante papel en la generación y conducción de la excitación.

Cada fibra muscular contiene una gran cantidad de miofibrillas y cada una de estas tiene unos 1500 filamentos de miosina y 3000 filamentos de

actina, que son las moléculas proteicas encargadas de la contracción muscular. Los filamentos gruesos son de miosina y los finos de actina, que se colocan de manera interpuesta, dotando a la miofibrilla de bandas claras (I) y de bandas oscuras (A) alternadamente.

Las bandas claras presentan esa característica ya que están integradas, fundamentalmente, por filamentos delgados de actina, mientras que las bandas oscuras se componen de filamentos gruesos de miosina y de filamentos delgados de actina. La porción central de cada banda A presenta una formación más clara que se denomina H, que desaparece cuando se produce la contracción muscular. Por su parte, cada banda I se divide en dos partes iguales demarcadas por una especie de disco, denominado línea Z. El espacio entre dos líneas Z se denomina sarcómero. Cuando la fibra muscular se contrae aparece un acercamiento entre las líneas Z, lo que indica que los sarcómeros se acortan.

Las observaciones realizadas en múltiples investigaciones han permitido concluir que durante la contracción muscular las dimensiones de las bandas A no se modifican, la longitud de las bandas I se reduce y desaparece la zona H de las bandas A. Esto permite afirmar que la contracción muscular es un proceso que se realiza gracias al deslizamiento de los filamentos de actina hacia la porción central de las bandas A.

Aún resulta discutida la forma concreta en que se realiza el desplazamiento de los filamentos de actina entre los de miosina, pero se acepta que los filamentos gruesos están formados por moléculas de miosina que presentan largas colas, en tanto que sus “ cabezas” forman apófisis que llegan a los miofilamentos finos. Estas cabezas se ubican en dirección contraria entre si en ambas mitades del miofilamentos finos están constituidos por dos hilos de actina colocados en forma de espiral doble, orientados en ambas direcciones, partiendo de la línea Z. Gracias a esta forma de distribución de las moléculas de actina y miosina en las dos mitades correspondientes a la banda A, los miofilamentos actínicos se mueven desde ambos lados del sarcómero, entrecruzándose en el centro de ésta.

Se considera que cada uno de estos entrecruzamientos, conocidos como “puentes cruzados”, se moviliza sin tener en cuenta a los restantes, funcionando de modo alternativo y continuo. En correspondencia con ello, mientras mayor sea el número de puentes cruzados en contacto con los mío-filamentos de actina en un momento determinado, mayor debe ser la fuerza de la contracción.

La puesta en funcionamiento del complejo sistema que se ha descrito, es decir, el acto de la contracción implica la existencia de trabajo y, por tanto, requiere energía. Ella aparece cuando las moléculas de ATP (Trifosfato de Adenosina) se desdoblán en ADP (Difosfato de Adenosina) y en los grupos de fosfatos (P) por la acción enzimática de la miosin-ATPasa.

En el músculo en reposo no se produce la escisión del ATP por la inferencia de la troponina, una proteína miofibrilar que, en esa situación, provoca su inactividad. Movilizar la troponina es una tarea que le corresponde a los iones de calcio, cuando son liberados por la presencia de un potencial de acción.

Cuando sobre una fibra nerviosa motora actúa una acción estimulante, ésta se transforma en un potencial bioeléctrico que se conoce como potencial de acción, y que es conducido a la placa terminal o sinapsis, punto de contacto con la fibra muscular.

El potencial de acción se propaga rápidamente sobre toda la membrana (sarcolema), difundiéndose al mismo tiempo hacia el interior de las fibras a través de los túbulos transversos (túbulos T), lo que produce la liberación de los iones de calcio que dejan de interferir la actividad miosin-ATPasa, propiciando el desdoblamiento del ATP y permitiendo la aparición de la energía necesaria para que los filamentos de actina se acerquen de manera progresiva, desarrollando el proceso de acortamiento. Una vez concluida la influencia del potencial de acción, todo el proceso se interrumpe y la fibra muscular retorna a su estado inicial.

Como se indicó antes, las fibras musculares esqueléticas no son exactamente iguales y esto se relaciona no solo con su estructura, sino

también con su funcionamiento. Existen fibras que manifiestan una forma de contracción rápida, que tienen una importancia fundamental en las actividades motoras que exigen contracciones musculares de gran intensidad y corta duración, tales como los saltos, el levantamiento de pesas, las carreras de distancias cortas, etc. Por otra parte, el organismo realiza acciones motoras que se caracterizan por reclamar contracciones musculares de moderada intensidad y larga duración, es el caso de las carreras de fondo, el ciclismo de ruta, etc.

La diferencia entre cada tipo de fibra está determinada por el nivel de actividad enzimática de cada una de ellas, específicamente de la miosin-ATPasa y de la glucógeno-fosforilasa y la fosfofructoquinasa, que intervienen en el metabolismo del glucógeno muscular y de la glucosa.

Las fibras de contracción rápida se encuentran mejor dispuestas para el trabajo en condiciones de insuficiencia de oxígeno o cuando la producción de ATP por vía aerobia es limitada. Por su parte, las fibras lentas pueden trabajar en esfuerzos de larga duración porque contienen mayores cantidades de enzimas mitocondriales que son las encargadas de la producción aeróbica del ATP.

Aunque las fibras rápidas y lentas tienden a ser empleadas en tareas específicas, durante la realización de esfuerzos prolongados tanto unas como otras se fatigan, lo que indica que si bien las fibras lentas se emplean fundamentalmente en los esfuerzos de larga duración, al fatigarse éstas, su lugar es ocupado por las fibras rápidas.

La existencia de ambos tipos de fibras y las características de su funcionamiento permitía pensar, inicialmente, que un régimen de entrenamiento específicamente dirigido a la resistencia podría modificar la proporción de fibras lentas en el músculo. Investigaciones posteriores pusieron de manifiesto que tal cosa no ocurre, modificándose solo la capacidad de ambos tipos de fibras para producir ATP, de donde se deduce que la composición de las fibras rápidas y lentas con que nace la persona desempeña un importante papel en su futuro deportivo.

Aunque se ha prestado mucha atención a la estructura y funcionamiento de la fibra muscular, lo que se deriva de la importancia de su

participación en el proceso de contracción, resulta evidente que en la realización del movimiento tienen que participan un elevado número de unidades motrices, es decir, músculos y grupos de músculos que permitan dar respuesta a las exigencias planteadas por la acción estimulante.

En condiciones normales los músculos esqueléticos responden a estímulos que provienen del encéfalo o de la médula espinal. Las contracciones musculares se clasifican en aisladas, cuando constituyen la respuesta a un solo estímulo y que, por no tener prácticamente presencia en el deporte, no serán consideradas; y contracciones musculares adicionadas, que no solo están presentes en la acción deportiva, sino también en las restantes manifestaciones motoras del organismo.

Cuando un músculo es estimulado de forma tal que el segundo estímulo llega cuando aún no se ha completado la respuesta al estímulo anterior (contracción y relajación) la tensión que éste es capaz de provocar en el músculo es superior a la del primero. Esto se explica al tomar en consideración que la acción de un estímulo reclama de un tiempo mínimo para realizar el reordenamiento estructural indispensable para lograr la máxima tensión.

Cuando aparece una cadena de dos o más estímulos, las contracciones se producen en rápida sucesión, los cambios estructurales logran completarse y puede lograrse mayor tensión muscular. Las contracciones pueden manifestarse de manera completa, tetanización, cuando la frecuencia de estimulación es tan alta que no permite la relajación del músculo; también puede ser de carácter incompleto cuando la frecuencia de los estímulos no es tan elevada y permite la relajación muscular parcialmente.

La tensión desarrollada por los músculos durante la contracción se pone de manifiesto en las más variadas formas. Si la resistencia externa es inferior a la tensión generada en el músculo el resultado es que éste se acorta y aparece el movimiento con un tipo de contracción concéntrica, también conocida como ausotónica o miométrica. Si la resistencia externa es superior a la tensión que puede generar el músculo durante la

contracción, entonces éste se alarga, ocurriendo un tipo de contracción excéntrica o pliométrica.

Estos tipos de contracciones se relacionan con el trabajo dinámico, es decir, con el trabajo que exige modificaciones longitudinales del músculo. En consecuencia, para lograr contracciones musculares lo suficientemente intensas y prolongadas como para provocar el movimiento resulta indispensable que sobre el tejido actúen un número importante de estímulos de manera continua.

La frecuencia de estimulación debe ser, por tanto, lo suficientemente alta como para provocar que el efecto contráctil de cada estímulo se incorpore al precedente y suficientemente baja como para que dicho efecto no surja en el tiempo que corresponda al período refractario absoluto de la fibra.

Cuando se alcanza una frecuencia de estimulación que logre cumplir estos aspectos, el grado de tensión de la fibra incrementa de manera gradual, pudiéndose alcanzar los valores máximos y mantenerlos durante el tiempo que se mantenga la excitación.

Los principios fisiológicos enunciados son también válidos para una forma de contracción tetánica que no implica movimiento: la contracción isométrica que se presenta cuando, ante considerables modificaciones de la tensión del músculo, sus dimensiones permanecen invariables. En este tipo de contracción muscular la fuerza aumenta progresivamente hasta alcanzar su valor máximo; si la acción estimulante se prolonga la fuerza disminuye también de manera progresiva como consecuencia de la aparición de la fatiga.

De lo señalado hasta aquí queda claro que el incremento de la tensión en el músculo depende del nivel de excitación que se manifieste en las unidades motrices, estructura básica que garantiza la contracción, que se conforma por una neurona motora localizada en la médula espinal y por todas las fibras musculares que son inervadas por dicha neurona.

El número de fibras musculares que son inervadas por cada motoneurona varía desde una hasta varios cientos, en dependencia del grado de precisión que se requiera de cada plano muscular.

Como lo indica su nombre, cuando la unidad motriz es excitada, todas las fibras musculares se contraen prácticamente de manera simultánea, es decir, no resulta posible que algunas fibras de una unidad motriz se relajen mientras otras se contraen. Además si las fibras musculares de una determinada unidad motriz son estimuladas con la suficiente fuerza, el nivel de contracción alcanza un grado máximo. Este principio es conocido como “ley del todo o nada” que establece que bajo determinadas condiciones o se contraen todas las fibras de la unidad motriz o no se contrae ninguna de ellas. Bajo este concepto es posible interpretar el proceso funcional que permite la contracción gradual del músculo.

Las unidades motrices integradas a un plano muscular solo se activan de manera simultánea cuando aparece un nivel de estimulación máximo. Si la situación no es esa, por ejemplo, ante contracciones submáximas, unas unidades motrices se encuentran trabajando en tanto otras se encuentran en estado de reposo, en un proceso continuo de intercambio que impide o retarda la aparición de la fatiga en las diferentes unidades.

Esta forma de trabajo muscular recibe el nombre de asincrónica, y es la que posibilita la realización de las contracciones voluntarias. Si se eleva la frecuencia de estimulación ante la cual se produce la activación de determinado número de unidades motrices, de modo que disminuya el tiempo de reposo de estas, aumenta el número total de unidades participantes en la contracción y puede lograrse una mayor fuerza. Esto pone de manifiesto que el indicador de fuerza que puede lograr un músculo en una situación determinada depende del número de unidades motrices que se encuentran activadas en ese momento.

Todo el proceso contráctil de las fibras musculares, que en consecuencia define la participación de las unidades motrices, está sometido a la regulación del sistema nervioso. Esto no solo resulta necesario para la realización de diferentes movimientos, sino también para garantizar una posición determinada del cuerpo y de cada uno de los segmentos que la integran.

El sistema nervioso central (SNC) debe desarrollar una cuidadosa selección en los planos musculares que participan en cada acción motora,

el momento en que se incorporará cada uno de ellos al trabajo y, además, regular el grado de tensión que deberá desarrollar para realizar el movimiento o mantener la postura.

Para solucionar la última de las tareas indicadas es preciso que el sistema nervioso central, utilice tres mecanismos:

a)- Número de unidades motrices activadas

Se considera unidad motriz activada aquella cuya motoneurona envía impulsos que son respondidos por las fibras musculares. En la medida en que sea mayor el número de unidades activadas en un músculo más elevada será la tensión que éste desarrolle.

La participación de mayor o menor cantidad de unidades motrices está determinada por la intensidad de las acciones estimulantes a las que son sometidas las motoneuronas que se integran a determinado plano muscular, por la acción de estructuras nerviosas de niveles superiores de la corteza motora y de los centros motores subcorticales. Teniendo en cuenta que todo músculo es inervado por diversos tipos de motoneuronas, las acciones estimulantes que actúan sobre él pueden revestir diferentes características, de forma tal que la excitación de un plano muscular puede manifestarse en variados niveles de tensión muscular dependiendo de que la acción estimulante proceda de motoneuronas pequeñas o grandes.

En correspondencia con la envergadura de la unidad motriz, el mecanismo de incorporación de éstas al trabajo se rige por la “ley de las dimensiones”. En correspondencia con ésta ley, las pequeñas unidades motrices participan de manera activa ante cualquier grado de tensión del músculo, sin embargo las de mayores dimensiones solo intervienen cuando el nivel de tensión muscular es muy elevado. Esto obliga a pensar que si se pretende desarrollar el grado de tensión máxima que puede generar el músculo no es posible lograrlo empleando cargas de trabajo que generen niveles de excitación de carácter moderado.

b)- Régimen de actividad de las unidades motrices

Como se ha indicado antes, en la medida en que se aumenta la frecuencia de impulsos que, procedentes de la motoneurona, llegan a la estructura

motora, mayor será el grado de tensión que desarrolla la unidad motriz y más importante el aporte que ésta realiza a la tensión general del músculo. Por ello resulta de extraordinaria importancia la regulación de la motoneurona como mecanismo para determinar el grado de tensión del músculo.

La frecuencia de estímulos procedente de la motoneurona está directamente relacionada con la intensidad de la excitación a la cual éstas son sometidas. Si la intensidad es de poca significación trabajan, fundamentalmente, las motoneuronas de bajo umbral y la frecuencia es relativamente pequeña; en este caso las unidades motoras se encuentran en régimen de contracción aisladas y la actividad se manifiesta en una contracción débil y de reducido gasto energético. Esta forma de contracción es común encontrarla en el esfuerzo físico necesario para mantener la posición vertical del cuerpo. De esta manera puede explicarse por que la lenta actividad de los músculos pueden prolongarse durante varias horas sin que se presente la fatiga.

Cuando se incrementa la acción de influencias excitantes sobre la motoneurona que llega a determinado músculo se produce un aumento de la tensión. Debe tenerse en cuenta que, en este caso, el aumento de la intensidad conduce no solo a la incorporación al trabajo de motoneuronas que antes se encontraban en estado de reposo, sino también al incremento de la frecuencia de estímulos de estas con relación a los impulsos de motoneuronas con niveles de excitación más bajos. Esto implica que las motoneuronas de umbrales mayores no están en condiciones de asimilar un régimen de trabajo de alta frecuencia, sin embargo las pequeñas motoneuronas, de bajo umbral de excitación, si generan una alta frecuencia y provocan que las pequeñas unidades motrices activas trabajen en un régimen de contracciones adicionadas.

De aquí se desprende que para lograr grandes tensiones musculares es preciso provocar una elevada frecuencia de estímulos que generen la aparición de contracciones tetánicas en las unidades motrices que participan en el trabajo, pero ello implica que este nivel de tensión del músculo pueda mantenerse por corto tiempo.

c)- Relación en tiempo de la actividad de diversas unidades motoras:

Uno de los aspectos de los cuales depende la tensión que pueda generar un músculo es la relación en tiempo de los impulsos emitidos por las diferentes motoneuronas que lo inervan. Si todas las unidades motrices de un músculo se logran contraer de manera sincrónica, la tensión general que puede lograrse es muy alta pero su oscilación resulta muy acentuada. Si el trabajo se realiza de manera asincrónica, el valor de la tensión generada es menor pero se obtiene un nivel de estabilidad muy alto.

En consecuencia, mientras mayor sea el número de unidades motrices que participan en el trabajo asincrónicamente las oscilaciones serán menores y la realización de los movimientos se efectuará con mayor ligereza y precisión.

Si el carácter de la contracción exige del músculo, tanto por la frecuencia como por la intensidad de los estímulos, una contracción incompleta, el tiempo de la actividad de sus unidades motrices prácticamente no tiene importancia para la magnitud desarrollada.

Ocurre lo contrario en los esfuerzos intensos de corta duración, donde la sincronización de la actividad generada por los estímulos en la motoneurona desempeña un singular papel al influir en la rapidez del desarrollo de la tensión, es decir, en la magnitud del “gradiente de fuerza.”

Esta sincronización está particularmente presente al iniciarse movimientos rápidos contra una gran carga externa y depende de que, al iniciarse el trabajo, la frecuencia de estímulos emitidos por las motoneuronas es mayor que en lo sucesivo.

Las posibilidades de coincidencias de los ciclos contráctiles de numerosas unidades motrices son muy elevadas, en correspondencia con la alta frecuencia inicial de impulsos y la actividad de una gran cantidad de motoneuronas. En consecuencia con ello, la rapidez del incremento del grado de tensión del músculo depende tanto del número de unidades motrices activadas como de la frecuencia inicial y el grado de sincronización de los impulsos emitidos por las motoneuronas que lo inervan