

# Capítulo 12 parte 1/4

## 12.1 EL MUSCULO, UN TEJIDO EXCITABLE MUY ESPECIAL

Al hablar de **contracciones** lo más fácil es asociarlas a **músculos** y a la contracción del músculo esquelético. Sin embargo es también un músculo el cardíaco o el que rodea las vísceras huecas, el intestino, por ejemplo. Para ver las diferencias lo primero que hay que pensar es en la función que cumple cada uno. Un **músculo esquelético** puede levantar un peso y sostenerlo y, con una estimulación adecuada, lograr, con una contracción en masa, la máxima fuerza, manteniendo su función. Una contracción en masa es impensable en el músculo cardíaco cuya función es impulsar la sangre. Debe contraerse siguiendo el orden determinado por el haz de His. El caso del intestino una de sus funciones es impulsar el contenido intestinal hacia el recto y las contracciones serán progresivas. Pese a sus diferencias, estos tres músculos tienen algo en común: **las proteínas contráctiles y que son tejidos excitables** (generan potenciales de acción)

No se puede hablar del músculo de una ameba, pero si mantiene su forma o emite pseudópodos es por que tiene proteínas contráctiles que movilizan los microfilamentos que mueven la membrana celular. Las cilias serían otro ejemplo de la intervención de proteínas contráctiles, pero no todos los movimientos están asociados a las proteínas contráctiles. Así el movimiento del girasol es un fototropismo y es debido que una parte del tallo aumenta su longitud más que otro. En el caso de las plantas carnívoras, una bomba osmótica haría que parte de la flor se desplace sobre otra, atrapando al insecto.

El estudio de los músculos plantea un problema de las definiciones de **trabajo, fuerza, tensión y presión**. En física **Trabajo o energía** es:

$$\text{Trabajo} = \text{fuerza} \cdot \text{espacio}$$

¿Un brazo que sostiene un peso y lo mantiene en una posición fija (contracción isométrica) no hace un trabajo y gasta una energía? Por supuesto que sí. Estirado inicialmente al máximo el tendón, contraído el bíceps, este seguirá haciendo un trabajo y gastando energía pero calórica.

INDICE. Parte 1	Página
12.1 EL MUSCULO, UN TEJIDO EXCITABLE MUY ESPECIAL	1
Músculo esquelético	2
- Organización	2
- Las unidades motoras	2
- La preparación ciático- gastrocnemio	4
12.2 MODO DE FUNCIONAMIENTO DEL MUSCULO ESQUELETICO	5
a) Curva contracción-relajación	5
b) Secuencia de eventos	5
c) Relación fuerza-lomgitud	6
d) Reclutamiento	6
e) Sumación	7
f) Contracción tetánica	9
g) Fuerza muscular y fatiga	10
12.3 LA UNION NUROMUSCULAR. UNA SINAPSIS COLINERGICA	11
- Características del PA en el músculo esquelético	12



Músculos de brazo y cuello - Leonardo Da Vinci

Ahora habrá que diferenciar **presión** de **tensión** y **fuerza** de **tensión**. Sabemos que **presión** es

$$\text{Presión} = \text{fuerza} \cdot \text{superficie}^{-2}$$

Y lo que genera la contracción de los ventrículos es una presión, la **presión arterial**.

El término **tensión** es algo un poco más complejo. Así, de la **tensión superficial** se deriva la Ley de Laplace (ver Cap. 9) y se aplica en vaso sanguíneo cuando hay un equilibrio entre la tensión de la pared del vaso y la presión arterial, de modo que radio **r** se mantenga constante. Así, si a la Ley de Laplace se la escribe como:

$$t = P \cdot r$$

$$\text{Y si Tensión } t = \text{dina} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ y } P = \text{dina} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$\text{dina} \cdot \text{cm}^{-1} = \text{dina} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{cm}$$

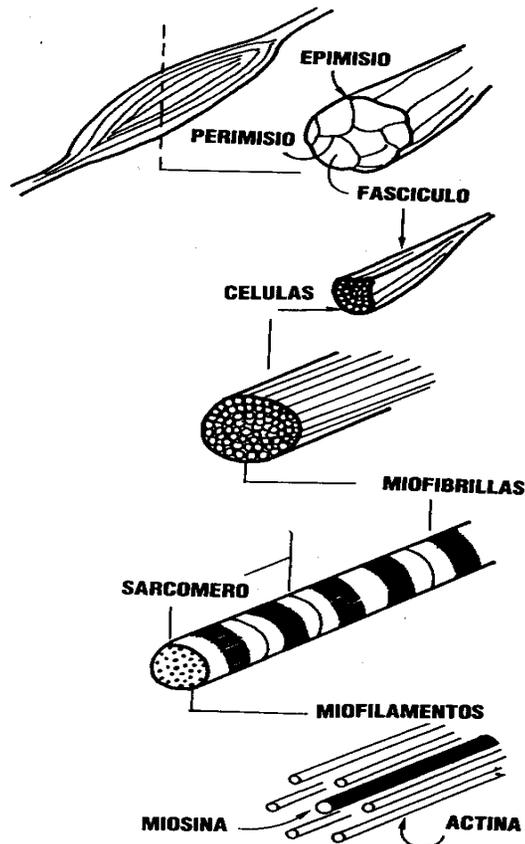
Simplemente se dirá que la tensión es una fuerza que se ejerce sin que se modifique la longitud. Al sostener un peso a una altura constante, el músculo está en tensión. Es frecuente hablar de *tensión emocional* y otros conceptos semejantes que no tienen, obviamente, unidades físicas. Es habitual en la jerga médica hablar de tensión arterial al tomar la presión con un esfigmomanómetro. Como es método indirecto basado en los ruidos de Korotkoff que se quiere relacionar con la presión arterial medida con un catéter intrarterial, sería más correcto hablar de Presión Arterial Sistólica y Presión Arterial Diástolica (PAS y PAD).

**Músculo esquelético:** su nombre deriva de estar insertado a estructuras óseas. Otra propiedad es que se estimula y se contrae por impulsos (potenciales de acción) que le llegan a través de terminales nerviosas y las sinapsis (unión neuromuscular y el neurotransmisor). Esta compuesto por **miositos** (células excitables), organizados de modo de formar **fascículos** y cada fascículo debe recibir su terminal nerviosa.

**Organización.** El músculo esquelético es el tejido de mayor **masa** que tiene el hombre ya que representa el 40% del peso

corporal. En un hombre de 70 kg hay 28 kg de músculo esquelético y de sus 42 litros de agua corporal, 22 litros, aproximadamente, están en sus músculos. El tejido muscular contiene más del 80% de todo el K<sup>+</sup> intracelular del cuerpo, mientras el plasma solo tiene el 5% del K<sup>+</sup> corporal. Bastaría que el 0,5% de todo el K<sup>+</sup> muscular pasara al plasma para que la concentración plasmática de K<sup>+</sup> subiera de 4,5 mEq/L a 9 mEq/L, una condición difícilmente compatible con la vida.

Un músculo esquelético no es una masa amorfa de células sino que tiene una organización (Fig. 12.1): 1) Todo el músculo esta rodeado por una cubierta fibrosa llamada **epimisio**; 2) Del epimisio nacen tabiques (**perimisio**) que dividen al músculo en **fascículos**. 3) Cada fascículo esta formado por un cierto numero de **células o fibras musculares**; 4) Las fibras o células musculares son largas (1 a 40 mm o más) y cilíndricas (10 a 100 µm de diámetro). Cada célula es multinucleada, tiene su membrana, el **sarcolema** y, en su interior, el **sarcoplasma**, se encuentran las **miofibrillas**. Las miofibrillas contienen, a su vez, a los **miófilamentos**, compuestos por **filamentos gruesos (miosina)** y **delgados (actina)**. El músculo se insertará en la estructura ósea por medio de tendones que son estructuras elásticas no excitables



**Las unidades motoras.** Las fibras nerviosas que activan las contracción de los músculos esqueléticos son mielínicas, pero pierden su vaina y se dividen dando finas ramas amielínicas en las proximidades de la célula que inervan. Las ramas amielínicas entran en contacto con el sarcolema de [as fibras musculares a través de una estructura especializada, la **placa terminal**.

Cada célula muscular tiene su placa terminal y su sinapsis, pero eso no quiere decir que a cada célula muscular le corresponda una neurona motora. Se llama **unidad motora** al conjunto formado por **una** motoneurona y todas las células musculares que ella inerva.

Para hacer un movimiento fino, preciso, como el de los ojos, se necesita que una neurona controle a pocas fibras musculares. Allí la unidad motora tendrá una relación 1:3 entre neurona y fibras. Por el contrario, para algo tan grosero como mantener la postura, los músculos reciben inervación a través de unidades motoras con relaciones 1:100 o mayores. Lo que el hombre no tiene es inervación cruzada de sus fibras musculares: dos neuronas diferentes no hacen sinapsis en una misma célula muscular.

Fig. 12.1 ORGANIZACIÓN DEL MUSCULO ESQUELETICO

Un músculo esquelético típico, como el bíceps, por ejemplo, tiene dos puntos óseos unidos por una articulación. Sin embargo, hay músculos, como el bucinador, que tiene una sola inserción ósea mientras que la otra se encuentra en la piel de la cara. También hay otros, como el esfínter externo del ano, que rodean una víscera hueca, como lo hacen los músculos lisos. A todos se los llama esqueléticos porque la estructura y la respuesta de estos músculos es similar.

Si lo que se mueve es una **palanca** ósea, esta puede ser, como todas las palancas en Física, de 1<sup>º</sup>, 2<sup>do.</sup> o 3<sup>er.</sup> género de acuerdo a la ubicación del punto de apoyo o fulcro (Fig. 12.2). En todas estas palancas habrá una **fuerza, (P)** la que hace el músculo, y una **carga o resistencia (R)**, la que se opone a la fuerza. Si la carga es superior a la fuerza que puede desarrollar el músculo no habrá desplazamiento del brazo de la palanca y el músculo se contrae sin que, aparentemente, cambie de longitud. Será una **contracción isométrica** (igual medida o longitud). Como ya vimos que Trabajo = fuerza . espacio, en una contracción isométrica no se realiza trabajo externo.

Por el contrario, si la palanca se mueve es porque la fuerza es superior a la carga y el músculo se acorta durante la contracción.

Si durante toda la contracción la fuerza desarrollada es la misma se hablará de una **contracción isotónica** (igual fuerza). Es difícil encontrar una contracción isotónica pura ya que se necesitaría que la carga fuese nula. Imaginemos que la palanca 12.2 c) es el movimiento del brazo y el antebrazo y que el antebrazo se mueve, sin ninguna carga en la mano ¿es un movimiento totalmente isotónico?

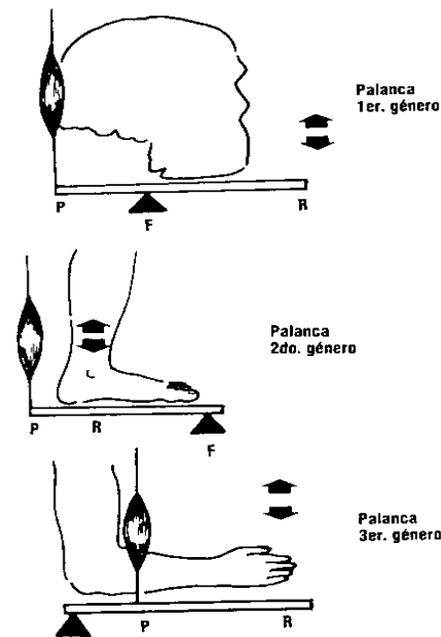


Fig. 12.2 LOS MUSCULOS ESQUELETICOS PUEDEN ACCIONAR PALANCA QUE SE CLASIFICAN DE ACUERDO A LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE APOYO

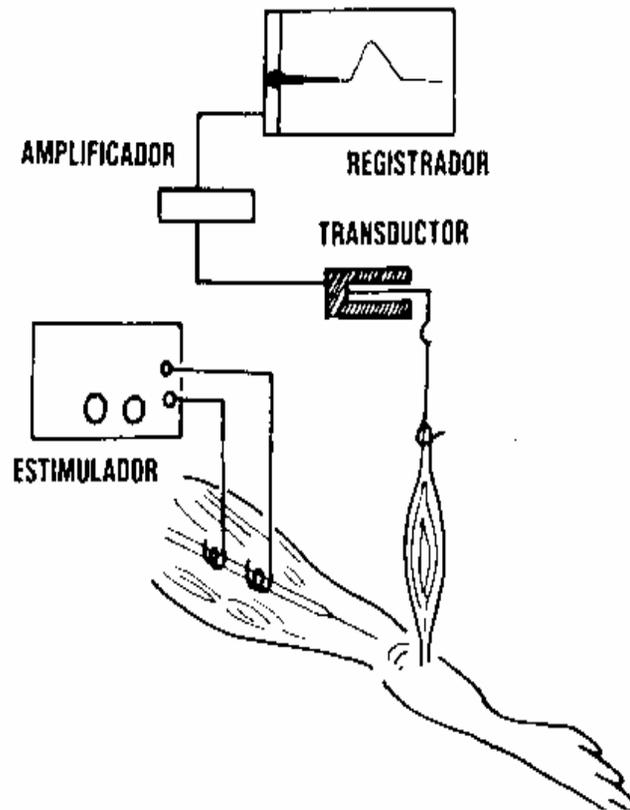


FIG. 12. 3 PREPARACION CIATICO-GASTROCNEMIO PARA EL REGISTRO DE LA CONTRACCION MUSCULAR EN UN SAPO

No, ya que el antebrazo tiene un peso. Sea que la contracción sea isotónica o isométrica, lo importante es que siempre podremos regular la fuerza ejercida y eso se hará, como veremos, través de tres procesos básicos: **sacudida simple, reclutamiento y sumación**. Estudiar estos fenómenos *in vivo* en el hombre es algo complicado, por lo que usaremos, para describirlos, algo clásico en fisiología muscular, la preparación ciático-gastrocnemio del sapo.

- **Los hechos experimentales. La preparación ciático - gastrocnemio de sapo.**

**Diseño experimental:** Para estudiar una **contracción isométrica** en esta preparación debemos contar con un estimulador y un sistema de registro, algo que ya conocemos de los capítulos anteriores. Debemos tener también un **transductor**. Este es un dispositivo eléctrico (Ver la Nota Aparte: COMO FUNCIONA UN TRANSDUCTOR "STRAIN-GAUGE") que transduce, transforma una forma de energía en otra, en este caso fuerza, en señal eléctrica. Esta es amplificada y llevada al registrador. Con el sapo descerebrado y desmedulado (o mejor anestesiado) se disecciona el nervio ciático y se libera el tendón del gastrocnemio. Alrededor del ciático se colocan electrodos y el tendón se ata al transductor con un hilo fuerte (Fig. 12.3) Enviando a través del estimulador pulsos cuadrados de voltaje y duración adecuados se podrá ver en el registrador la contracción muscular

## 12. 2 MODO DE FUNCIONAMIENTO DEL MUSCULO ESQUELETICO

a) **Análisis de la curva contracción-relajación:** Dándole al músculo una longitud inicial apropiada (ver luego) es posible observar una curva como la que muestra la Fig. 12.4a):

1) la fuerza desarrollada alcanza su máximo unos 50 a 75 ms después de comenzada la contracción; 2) pasado el máximo de fuerza, esta disminuye progresivamente hasta volver a la línea de base en otros 100-150 ms. A este sistema de registro de la fuerza desarrollada por el músculo le podemos agregar un osciloscopio, el sistema de registro de los PA. Para ello colocamos electrodos en el nervio ciatico y en el mismo músculo, como vimos en el Cap. 11, y así podemos obtener lo que muestra la Fig. 12.4b).

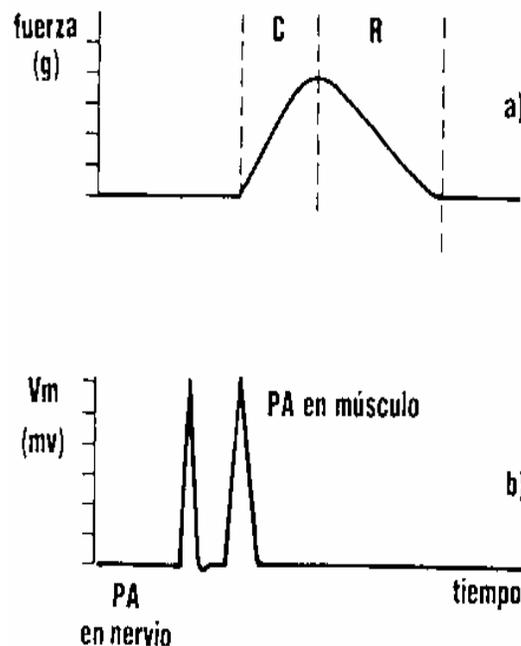
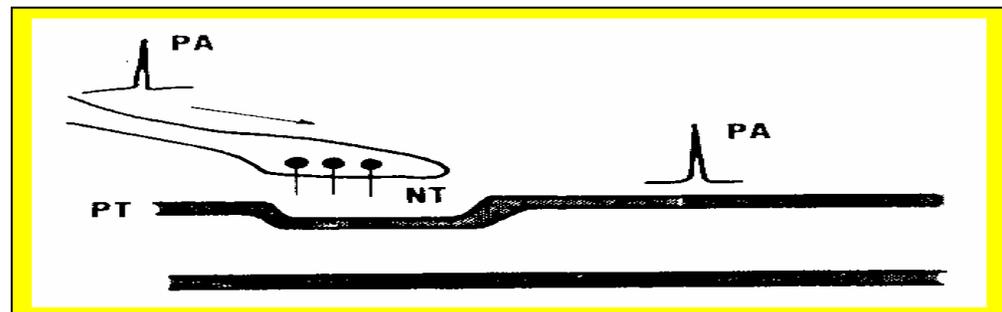


FIG. 12.4 a) CURVA DE CONTRACCION (C) Y RELAJACION (R) EN EL MUSCULO; b) PA EN EL NERVO Y EN EL MUSCULO. NOTESE QUE AMBOS SON DE CORTA DURACION Y QUE PRECEDEN A LA CONTRACCION

Obsérvese que: 3) el potencial de acción en el nervio ocurrió **antes** de que comenzara la contracción; 4) el PA en el músculo apareció antes del comienzo de la contracción y terminó cuando el músculo todavía no había alcanzado la máxima fuerza. Recuérdese que un PA de músculo esquelético, un fenómeno eléctrico, tiene una duración menor de 5 ms y que la contracción es un fenómeno mecánico que tiene una duración del orden de los 50 o más milisegundos.

b) **Secuencia de eventos necesaria para comenzar una contracción en un músculo esquelético.** Lo señalado en el párrafo anterior puede ser explicado del siguiente modo (ver abajo) 1) El estímulo produce una despolarización en el nervio que genera un PA; 2) Este PA viaja hacia la sinapsis (Placa Terminal - PT) con una velocidad de 30 a 100 m/s; 3) En la sinapsis se libera el NT (acetilcolina para el músculo esquelético) y hay un **retardo sináptico**, que es del orden de los 0,5 ms; 4) Aparece, en el músculo, otro PA; 5) Se inicia la contracción; 6) No habiendo más que **un** PA, a la fase de contracción sigue una fase de relajación. A esta contracción, relacionada con solo un PA y una sola contracción, se la llama **sacudida simple**.



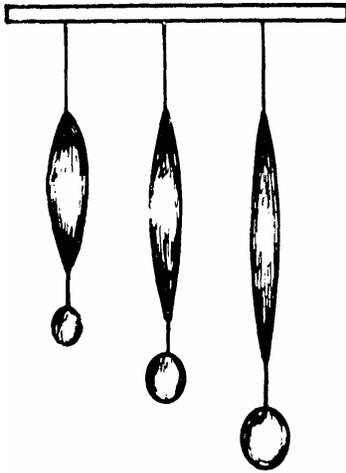


Fig. 12.6 UN MUSCULO PUEDE SER ESTIRADO PASIVAMENTE POR PESOS CRECIENTES. LA FUERZA QUE DESARROLLE EL MUSCULO EN LA CONTRACCION ESTARA EN RELACION CON ESTE ESTIRAMIENTO PASIVO

**d) Relación fuerza-longitud.** Un músculo no es un trozo de metal con una longitud fija, sino que es un material elástico que puede ser estirado, aplicando una carga en sus extremos. En la Fig. 12.6 se ve un músculo que alcanza tres longitudes diferentes gracias a tres cargas diferentes, aplicadas cuando el músculo está en reposo, sin recibir un estímulo y sin contraerse.

La pregunta sería: ¿la fuerza que puede desarrollar el músculo cuando se contraiga por efecto de un estímulo, será la misma en los tres casos? Como vimos en el Cap. 9 (Curva de Frank-Starling) el músculo desarrolla una fuerza **activa** que está en relación con el estiramiento pasivo. La grafica de la Fig. 12.7 tiene, en el eje X, la longitud del músculo y en el eje Y, la fuerza que desarrolla.

Se puede ver que desde  $L_1$  hasta  $L_2$  hay un incremento de la fuerza activa proporcional a la longitud alcanzada por el estiramiento pasivo, de  $L_2$  a  $L_3$  la fuerza es prácticamente la misma pese a continuar estirándose el músculo, de  $L_3$  a  $L_4$  la fuerza comienza a disminuir. ¿Cuál sería la longitud inicial **apropiada** a que se hizo referencia en el párrafo b)? Pues la que permitiría alcanzar el máximo de fuerza o, lo que es lo mismo, cualquier longitud entre  $L_2$  y  $L_3$ .

Un músculo esquelético de un ser vivo tiene una distancia entre sus inserciones tal que le permite desarrollar su máxima fuerza. Esta longitud, llamada longitud de reposo, se la suele abreviar como  $L_0$ . Por lo tanto, en nuestra preparación de ciático-gastrocnemio de sapo será muy importante, al comenzar el experimento, realizar esta curva de fuerza-longitud y determinar con qué estiramiento debemos trabajar. Por supuesto que se puede trabajar con estiramientos entre  $L_1$  y  $L_2$ , pero los resultados serán menos reproducibles.

e) **Reclutamiento.** Un estímulo despolarizante aplicado al **nervio** es capaz, como vimos, de producir una sacudida simple. Para que esto ocurra, claro, el estímulo debe ser capaz de alcanzar el umbral y generar el PA.

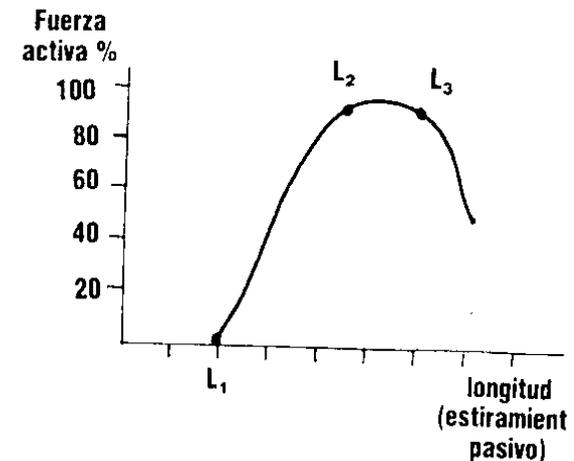


Fig. 12.7 RELACION ENTRE LA LONGITUD ALCANZADA POR ESTIRAMIENTO PASIVO Y LA FUERZA ACTIVA DE CONTRACCION

¿Y si aplicamos estímulos supraumbrales crecientes? Obtendremos contracciones musculares con una fuerza, hasta cierto límite, también creciente (Fig. 12.8). Esto es debido a que el estímulo fue aplicado a un nervio formado por cientos de axones que necesitan, cada uno, que le llegue una cantidad apropiada de cargas. Al aplicar estímulos de voltaje creciente se reclutan más axones, se libera NT en más uniones neuromusculares y más fibras musculares se contraen, haciéndose mas fuerza. ¿Por qué la relación voltaje del estímulo-fuerza de contracción tiene un límite, un máximo? Simplemente porque, a un determinado voltaje, todas las fibras musculares han sido activadas. Podemos ahora pasar fácilmente del sapo al hombre: una breve caricia y un golpe son formas de contracción muscular que se diferencian fundamentalmente en el número de **unidades motoras** que fueron activadas o reclutadas (Ver la Nota Aparte: LA LEY DEL TODO O NADA APLICADA AL MUSCULO ESQUELETICO).

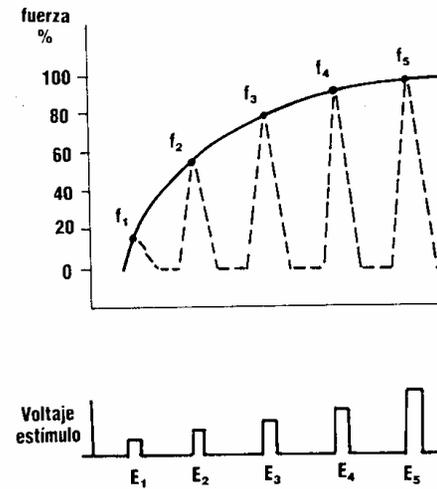


Fig.12.8 RECLUTAMIENTO. AL AUMENTAR EL VOLTAJE DEL ESTIMULO SE OBTIENE UNA FUERZA MAYOR YA QUE ESTIUMULAN MAYOR NUMERO DE FIBRAS MUSCULARES

**f) Sumación.** Volvamos un momento a la Fig. 12.5, la que muestra la curva contracción-relajación. Esta fue una sacudida simple, producto de un único pulso estimulador. Ahora, a través de una de las funciones de nuestro estimulador, enviemos dos pulsos cuadrados seguidos. Como vimos en el Cap. 11, a esos pulsos se los conoce como **pulsos gemelos** (*twin pulses* en ingles) y al tiempo que media entre dos pulsos de este tipo, como **retraso** (*delay* en ingles). En la Fig. 12.8 hay cuatro situaciones diferentes. En 12.8a) se enviaron dos pulsos gemelos separados por 250 ms: se obtiene dos respuestas, dos sacudidas simples perfectamente separadas. En b) la separación es de 150 ms y se ve que son dos contracciones, pero montadas una arriba de la otra: la relajación de la primera contracción no alcanza la línea de base y la segunda tiene una altura, una **fuerza** mayor. Se dice, entonces, que ha habido **sumación** de las contracciones



Fig. 12.8 a) 250 ms

b) 125 ms

c) 75 ms

d) 30 ms

En c), con 75 ms de "delay" la suma es casi completa y la fuerza desarrollada por el músculo es casi doble de una sacudida simple. Por ultimo, en d), con 30 ms, hay sumación completa, una sola curva y doble de fuerza. La manera mas simple de explicar este fenómeno de sumación es diciendo que, como en este ejemplo del músculo gastrocnemio de sapo, la contracción dura unos 50 ms y la relajación alrededor de 100 ms, es lógico que una segunda contracción, iniciada antes de la relajación completa, alcance al músculo parcialmente relajado (situaciones b y c) o todavía contraído (d) y se "monte" sobre la primera. Veremos, al tratar el modelo de músculo esquelético, que el tendón y los otros componentes elásticos del músculo son fundamentales para explicar la sumación.

**f) Contracción tetánica:** Comprendido que un músculo (¡y una fibra muscular aislada!) puede sumar hasta el doble de la fuerza desarrollada por una sacudida simple, cabe preguntarse que pasa si enviamos tres pulsos seguidos... o cuatro o cinco o mas pulsos. Ya no hablaremos de retraso sino de **frecuencia (f) y periodo (P)**. La frecuencia se mide en pulsos por segundo (PPS) y el periodo ( $P = 1/f$ ) en milisegundos. Con 4 PPS tendremos un periodo de  $1000 \text{ ms}/4 = 250 \text{ ms}$ , con 8 PPS uno de 125 ms, etc. Obviamente empezaremos a ver sumación con pulsos repetitivos de una frecuencia superior a los 5-6 PPS (200-166 ms entre pulsos). En la figura 12.11 se ve la contracción muscular con estímulos de frecuencia creciente: al principio hay sumación (no llega a la línea de base, la fuerza es mayor a la de una sacudida simple) pero luego aparece un fenómeno nuevo ya que la relajación es mínima y la fuerza es mayor que et doble. Por ultimo no hay relajación y la fuerza es casi cuatro veces la que se consigue con una sacudida simple. Estas dos condiciones se conocen como TETANOS INCOMPLETO y TETANOS COMPLETO. Volveremos sobre el, para explicarlo, cuando hayamos visto el funcionamiento del sarcómero y el papel del  $\text{Ca}^{++}$  pero por ahora debemos entender que es un fenómeno totalmente fisiológico. Muy pocas veces en nuestra vida cotidiana hacemos contracciones musculares a través de sacudidas simples.

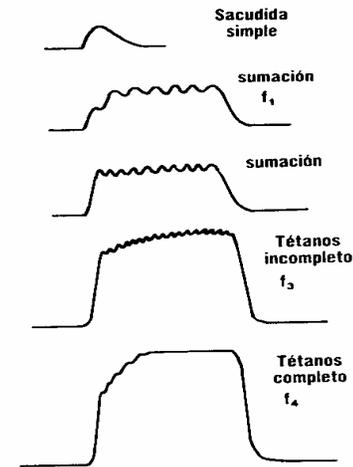


Fig. 12. 9 CON ESTIMULOS REPETIDOS APARECE SUMACION A FRECUENCIAS RELAVTIVAMENTE BAJAS, PARA CONVERTIRSE EN TETANOS COMPLETO E INCOMPLETO A FRECUENCIAS ALTAS

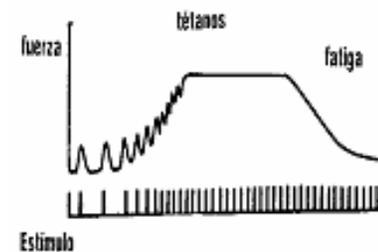


Fig. 12.10 MANTENIENDO UNA CONTRACCION TETANICA POR UN CIERTO TIEMPO SE PRODUCE FATIGA Y DISMINUCION DE LA FUERZA DE CONTRACCION

Generalmente mantenemos una contracción por segundos o minutos y si ésta es intensa (levantar un objeto pesado, por ejemplo), lo hacemos a través de una contracción tetánica. El **reclutamiento** y la **contracción tetánica** son formas naturales de regular la fuerza muscular. No se debe confundir con otras entidades patológicas de nombre parecido (Ver la Nota Aparte: TETANOS, TETANIA, CALAMBRE Y CONTRACCION TETANICA).

**h) Fuerza muscular y fatiga.** La fuerza que un músculo puede hacer, suponiendo un máximo esfuerzo, una contracción titánica, esta en relación, por supuesto, con su tamaño. Nadie puede imaginar que el flexor de un dedo haga la misma fuerza que los gemelos o el cuadriceps. Sin embargo, si se toma la fuerza por unidad de **área transversal**, para los mamíferos se encuentra un valor relativamente constante de 3 a 4 kg/cm<sup>2</sup>. Así la contracción del bíceps permitirá levantar 20-30 kg mientras que la fuerza contráctil del glúteo es superior a los 1000 kg.

Todo el mundo sabe que un músculo en contracción máxima y sostenida se **fatiga** y prueba de ello es que, con el tiempo, (a fuerza que puede desarrollar comienza a disminuir. En la Fig. 12.10 se ha representado lo que ocurre cuando la preparación ciático-gastrocnemio de sapo es sometida a una estimulación con frecuencias altas y mantenida en esa condición por un cierto tiempo. La fuerza disminuye progresivamente hasta que la preparación se vuelve inexcitable. Como en este sistema el sapo esta vivo y el músculo recibe su aporte de sangre, esta fatiga se supera algunos minutos después de interrumpirse la estimulación.

#### LA LEY DEL TODO O NADA APLICADA AL MUSCULO ESQUELETICO

Cuando, en el Cap. 10, se habló de la Ley del **Todo o Nada** se indicó que, en **un** axón o en **una** fibra muscular, un estímulo despolarizante dispara un PA si el potencial de membrana llega al umbral. También se dijo que si se aplican estímulos supraumbrales la respuesta es también un PA. La respuesta (PA) se ha hecho independiente de la magnitud del estímulo. Para el **nervio** (Cap. 11) las cosas se complican, ya que puede haber reclutamiento: un estímulo puede ser subumbral para un axón pero umbral o supraumbral para otro. La amplitud del potencial registrado en la superficie del nervio aumenta a medida que aumenta el voltaje del estímulo hasta que todos los axones han sido reclutados.

Para el músculo esquelético pueden hacerse consideraciones similares: una fibra o célula muscular aislada responde a la ley de todo o nada, no sólo porque, superado el umbral, se dispara el PA, sino porque también se inicia una sacudida simple, una contracción. Recordemos ahora lo que es una unidad motora: una neurona y todas las células musculares que ella inerva. Si se dispara un PA en la neurona, se puede esperar que se contraigan todas las fibras musculares inervadas por esa neurona. De ese modo, para una unidad motora con una relación 1:10, la ley del todo o nada dirá que un PA en el axón generó 10 PA en el músculo y 10 contracciones. De ese modo, es fácil entender que la contracción mínima que puede producir ese músculo es la activación de 10 células musculares. ¿Cuál es el máximo? Depende del número de neuronas motoras vinculadas a ese músculo. Si, por decir una cifra, hay 100 neuronas, el máximo reclutamiento se logra cuando las 100 neuronas se disparan, contrayendo 1000 fibras musculares.

### 12. 3 LA UNION NEUROMUSCULAR. UNA SINAPISIS COLINERGICA

La contracción del músculo esquelético ocurre, fisiológicamente, sólo a través del impulso nervioso, por la llegada de un PA al elemento presináptico. Eso lo diferencia del músculo liso, que es sensible, puede iniciar una contracción, por efecto de sustancias aplicadas a su superficie. La unión neuromuscular es una sinapsis colinérgica típica, por lo que sugerimos al estudiante volver a leer lo señalado al respecto en el Cap. 11. Aquí debemos agregar lo siguiente: 1) A la unión neuromuscular también se la llama **placa motora terminal** o simplemente **placa motora**; 2) Es una sinapsis exclusivamente excitatoria, de modo que únicamente genera PEPS (potencial excitatorio postsináptico) que recibe el nombre particular de **potencial de placa terminal (PPT)**; 3) Es una sinapsis "muy" colinérgica: un solo PA presináptico libera 10 veces más acetilcolina que la necesaria para generar un PPT lo suficientemente amplio como para generar siempre un PA; 4) La acetilcolina se une a receptores específicos de tipo **nicotínico**, donde el **curare** puede actuar competitivamente. (Ver las Notas Apartes del Cap. 11: EL CURARE y LA ESPECIFICIDAD DE LOS RECEPTORES COLINERGICOS); 5) El PPT es debido a un aumento de las conductancias al  $Na^+$  y al  $K^+$ , de donde resulta una corriente **net**a entrante, despolarizante.

La aparición del PPT determina, en la membrana postsináptica, en el sarcolema que se encuentra inmediatamente debajo de la hendidura sináptica, una zona despolarizada (Fig. 12.11) pero sin producir allí ningún PA. A partir de esta zona despolarizada se originan, en ambos sentidos, corrientes locales, electrotonicas, que determinan, ahora si, potenciales de acción en las zonas vecinas de la membrana de la fibra muscular. Los PA se propagan, como lo harían en un axón, a través de despolarizaciones y PA sucesivos. Los túbulos T, como ya veremos, son invaginaciones de la misma membrana que aproximan la membrana y al mismo extracelular a las fibrillas y al aparato contráctil. De ese modo los túbulos T hacen que los PA, sin dejar de ser un fenómeno de membrana, lleguen a zonas profundas de la célula muscular.

Obviamente hay algo que hace que la membrana de la célula muscular donde aparecen los PPT y donde aparecen los PA se comporta de modo diferente, del mismo modo que hay algo que hace diferente el extremo desnudo de un axón y un nodo de Ranvier.

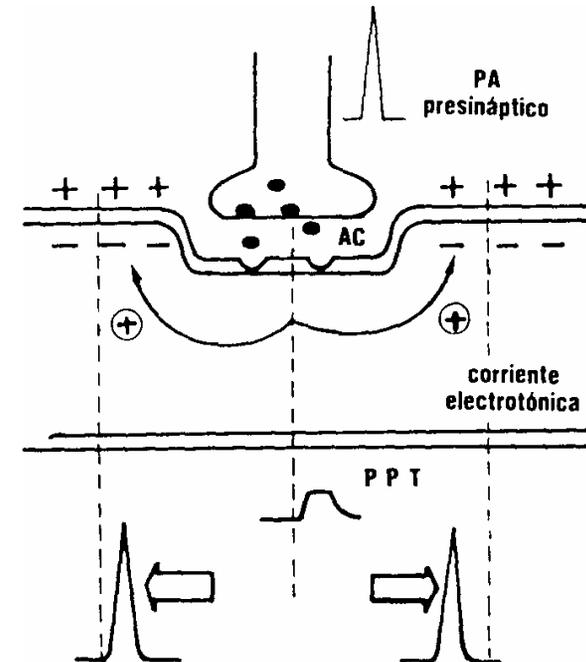


Fig. 12.11 EN LA MEMBRANA POSTSINAPTICA DE LA UNION NEUROMUSCULAR APARECE UN POTENCIAL GRADUADO (POTENCIAL DE PLACA TERMINAL - PPT) QUE GENERA UNA CORRIENTE LOCAL QUE PRODUCE PAs EN LA MEMBRANA MUSCULAR ADYACENTE

### TETANOS, TETANIA, CALAMBRE Y CONTRACCION TETANICA

Estos son términos de uso muy frecuente en Medicina y hay que saber diferenciarlos. Lo común a todos es la presencia, en uno o varios músculos esqueléticos, de una contracción fuerte sostenida, pero su origen es distinto en cada caso. **Tétanos**: Es una enfermedad infecciosa adquirida por la contaminación con *Clostridium tetani*. La contracción violenta de los músculos dorsales y los maseteros es el elemento clave de la enfermedad. Se debe, como se vio en el Cap. 11, al bloqueo de la inhibición que normalmente ejerce el circuito de Renshaw. **Tetania**. Es el cuadro que aparece en las hipocalcemias severas, generalmente relacionadas con hipoparatiroidismo. Hay contracciones muy características en los músculos de la mano e hiperreflexia. La hipocalcemia alteraría la estabilidad de los canales de Na<sup>+</sup>, con aumento de la excitabilidad. **Calambre**. Es una contracción muscular muy intensa y dolorosa bastante frecuente. Puede aparecer espontáneamente o después de un ejercicio intenso y hay personas predispuestas. Un registro de los PA en el nervio eferente muestra frecuencias de descarga por encima de los 300 pps, muy superiores a las observables en una contracción voluntaria. Se lo vincula a las alteraciones de las eferencias inhibitorias que normalmente posee el músculo. Mejora estirando el músculo. **Contracción tetánica**. Es lo que fisiológicamente hacemos para lograr una contracción sostenida.

Las diferencias son:

- En la membrana postsináptica de la placa motora hay canales acetilcolina dependientes (agonista o ligando dependientes)
- en la membrana de la célula muscular hay canales de Na<sup>+</sup> voltaje-dependientes.

### - Características del PA del músculo esquelético

Los PA originados en la membrana muscular por los PPT son, en general, similares a los observados en los axones mielínicos, aunque tienen una duración algo mayor (unos 5 ms). Pueden ser bloqueados por TTX, por lo que están relacionados con canales de Na<sup>+</sup> voltaje-dependientes. Se propagan a lo largo de la membrana por despolarizaciones y PAs sucesivos con una velocidad orden de los 3-5 m/s, una velocidad mucho menor al de los nervios mielínicos

Ahora podemos hacer dos preguntas claves: 1) ¿En una unión neuromuscular puede haber, sumación espacial ?; 2) ¿En una unión neuromuscular puede haber sumación temporal? Las respuestas están al final del capítulo.

### LA DESCARGA DEL NEUROTRANSMISOR Y LOS POTENCIALES MINIATURA

El músculo esquelético necesita, para iniciar la contracción, que llegue un PA a la plata terminal (PT), libere acetilcolina y genere Pas en la membrana celular. Sin embargo, en ausencia del PA axónal, los alrededores de la PT no se muestran silenciosos sino que es posible detectar la presencia de potenciales pequeños e irregulares que pueden ser bloqueados, como los PPT, por curare. A estos potenciales se los conoce como potenciales miniatura. La idea es que hay una descarga continua y espontánea de vesículas sinápticas que contienen acetilcolina y que cierto número de canales acetilcolina-dependientes se estaría abriendo y cerrando constantemente en la membrana postsináptica. Eso haría que la llegada del PA encuentre un cierto nivel basal de canales abiertos, lo cual es, por cierto, una facilitación

FIN DE LA PARTE 1 DEL CAPITULO 12 . CONTINUA PARTE 2