

CAPÍTULO 6

Biofísica del aparato locomotor animal

Francisco Pellegrino, Joaquín Bruzzo Lafratto

Introducción

En el organismo animal podemos encontrar los tres estados de agregación de la materia: *gaseoso*, en el aire que fluye por los alvéolos pulmonares; *líquido*, en la sangre que circula por los vasos sanguíneos; o *sólido*, presente en los huesos y músculos que constituyen el sistema músculo esquelético que da sostén, estabilidad y movimiento a los animales.

En este capítulo nos enfocaremos en el estado sólido, el cual se distingue de los otros dos estados por presentar forma y volumen definido. Esto se debe a la presencia de importantes fuerzas de atracción electromagnéticas entre las moléculas que lo conforman, como veremos más adelante, que hace que las mismas se encuentren muy próximas entre sí. Asimismo, dichas moléculas presentan posiciones fijas, lo que confiere a los cuerpos sólidos regularidad en su estructura interna y una rigidez característica. Sin embargo, vale resaltar que no es absolutamente rígido, pudiendo sufrir ligeras modificaciones tanto de forma como de volumen al ser sometido a fuerzas externas considerables.

A continuación, veremos sus principales características y propiedades, así como las fuerzas interiores y exteriores que las determinan.

Algunas características de los cuerpos sólidos

Densidad

Como ya explicamos en el Capítulo I, la densidad es la relación entre la cantidad de masa de un cuerpo y el volumen que ocupa el mismo. En el caso de los materiales sólidos dependerá de la cantidad de átomos que estos contengan, que aportarán la masa, como también de la

separación que exista entre los mismos, lo que determinará el volumen final del material. Esta magnitud vectorial varía mínimamente ante cambios de temperatura y presión. Por ello, las densidades de los diferentes materiales se han establecido a 0°C y a 1 atmósfera de presión.

La excepción es el agua, cuya densidad fue determinada a 4°C siendo su valor de 1 g/cm³. En líneas generales, al producirse un aumento de la presión, la densidad también aumenta. En cuanto a su variación ante cambios de temperatura, al aumentar la misma la densidad disminuye (la presión debe permanecer constante).

Dilatación

Cuando un cuerpo sólido es expuesto a una fuente de calor sufre un aumento en sus dimensiones debido a un aumento de su temperatura interna. Dicho proceso se conoce comúnmente como *dilatación* y ocurre porque el calor aumenta las vibraciones de los átomos y moléculas que conforman el sólido, haciendo que las mismas pasen a tomar posiciones más alejadas de las que tenían originalmente. En consecuencia, el cuerpo sólido se dilata en todas sus dimensiones (largo, ancho y alto), dando origen a dilataciones de tipo lineal, superficial y volumétrica.

Dilatación lineal: La variación se produce en el *largo* de un cuerpo, es decir, en su longitud (Fig. 6.1). Se dice que experimenta un aumento de unidad de longitud cuando su temperatura aumenta en 1°C.

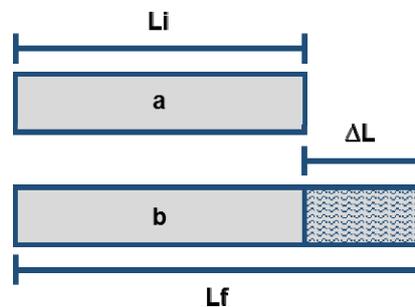


Fig. 6.1: Cuerpo sólido antes (a) y después (b) de ser expuesto a una fuente calórica.
Li: longitud inicial; *Lf*: longitud final; ΔL : dilatación lineal (alargamiento).

Dilatación superficial: En este caso la variación se produce en dos dimensiones, largo y ancho (Fig. 6.2).

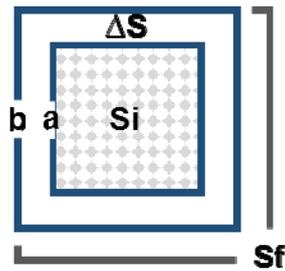


Fig. 6.2: Cuerpo sólido antes (a) y después (b) de ser expuesto a una fuente calórica.
Si: superficie inicial; Sf: superficie final; ΔS: dilatación superficial.

Dilatación volumétrica: El cuerpo sólido experimenta la variación en tres dimensiones, largo, ancho y alto (Fig. 6.3).

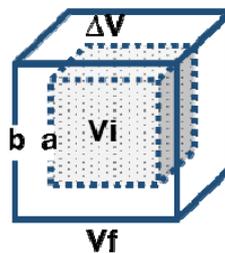


Fig. 6.3: Cuerpo sólido antes (a) y después (b) de ser expuesto a una fuente calórica.
Vi: volumen inicial; Vf: volumen final; ΔV: dilatación volumétrica.

Calor específico

Se conoce como calor específico a la cantidad de calor que es necesaria agregar a un gramo de sustancia para elevar su temperatura en 1°C. El calor específico es característico de cada sustancia y su valor dependerá de la temperatura inicial de la misma. En cuanto a su unidad de medida, en el S.I. el calor específico se mide en Joule / kilogramo por grado Kelvin (J/kg.°K); otra unidad utilizada frecuentemente es la caloría / gramo por grado centígrado (cal/g.°C). En la siguiente tabla (Tabla 6.1) se expresan valores de calor específico correspondientes a algunas sustancias.

Tabla 6.1: Calor específico de algunos materiales.

Sustancia	Calor específico
Hierro	0,110
Plata	0,054
Hielo	0,460
Vidrio	0,170

**calor específico expresado en cal. g⁻¹. °C⁻¹*

Adhesión

La adhesión es una propiedad de la materia donde ciertas sustancias al ser aplicadas unas contra otras se unen, formando un solo cuerpo. La adhesión puede darse entre superficies de un mismo material o de diferente, donde las mismas se mantendrán unidas gracias a las fuerzas intermoleculares. Un ejemplo claro de este proceso es la unión del cemento con el ladrillo.

Es importante destacar que las características finales de la adhesión formada dependerán de las superficies que entren en contacto, de la fuerza que se ejerza para unirlos y del tiempo que estas mismas tengan para actuar.

Difusión

La difusión es un proceso que involucra el movimiento de átomos. Los átomos que conforman los gases, líquidos y sólidos se encuentran en constante movimiento, desplazándose a lo largo del tiempo. En los cuerpos sólidos, el proceso de difusión es más complejo que en los otros estados de la materia, debido a las uniones que mantienen a los átomos en posiciones fijas de equilibrio. Por ello, para que se produzca difusión de átomos en los cuerpos sólidos es necesario que exista una fuerza que impulse a los átomos a desplazarse, el calor. Ante un incremento de la temperatura se producirá lo que se conoce como vibración o agitación térmica, haciendo que los átomos de un sólido se desplacen.

El proceso de difusión en sólidos puede darse a través de dos mecanismos:

1. Mecanismo de difusión por vacantes o sustitucional

Los átomos se mueven de una posición a otra gracias a la presencia de vacantes (espacios vacíos disponibles) y de la energía que permite el desplazamiento, la cual es proporcionada por la vibración térmica de los átomos (Fig. 6.4). Así, la energía térmica será un factor clave, ya que

a medida que aumente la temperatura se producirán más vacantes y habrá más energía disponible para el desplazamiento de los átomos, siendo la velocidad de difusión proporcional a la misma.

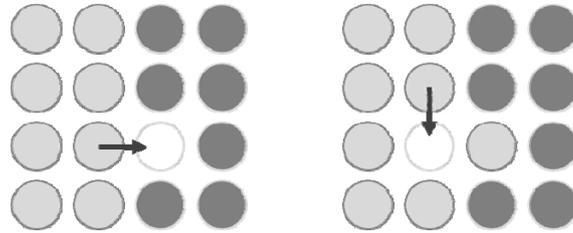


Fig. 6.4: Difusión de átomos por mecanismo de vacantes.

2. Mecanismo de difusión intersticial

En este caso, los átomos se desplazan desde una posición intersticial a otra cercana que esté desocupada. El tamaño de los átomos que difunden es pequeño comparado con los otros que también constituyen el cuerpo sólido (Fig. 6.5).

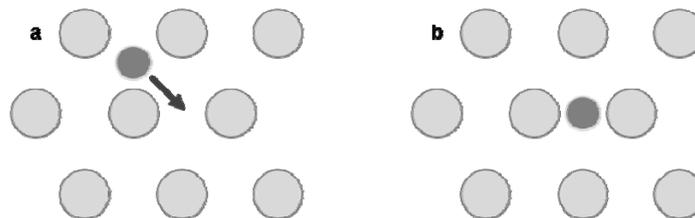


Fig. 6.5: Difusión de átomos por mecanismo intersticial. Posición antes (a) y después (b) de la difusión.

Choque

Se conoce como choque a la colisión o impacto que se produce cuando un cuerpo que presenta una determinada masa (m_1) y velocidad (v_1) encuentra en su trayectoria otro cuerpo con otra masa (m_2), el cual puede estar en reposo o hallarse dotado de una cierta velocidad (v_2) (Fig. 6.6). El choque se caracteriza por ser de muy corta duración y porque entre ambos cuerpos existirá transmisión de energía, que será finalmente quien determinará las consecuencias del mismo.



Fig. 6.6. Choque entre dos sólidos en movimiento (a) y entre un sólido en movimiento y otro en reposo (b).

Podremos diferenciar entre dos tipos de choques dependiendo de si una vez producido el mismo, se conserva o no la energía cinética de los cuerpos. Así, tendremos *choques elásticos*, donde se conservará la energía cinética no produciéndose deformaciones permanentes en los cuerpos (comportamiento elástico) y, *choques inelásticos*, en los cuales sí se producirá una deformación permanente en uno o más de los cuerpos involucrados (comportamiento plástico).

En los animales, podremos ver las consecuencias internas y externas que produce el choque de un vehículo cuando atropella un perro o también, al producirse una fuerte caída que comúnmente origina fracturas en huesos largos como radio y cubito.

Fuerzas interiores y exteriores

Los cuerpos sólidos están formados por moléculas que se encuentran unidas entre sí por fuerzas de origen electromagnético. Esto se debe a que cada una de las moléculas que compone un sólido se encuentra constituida por átomos, los cuales a su vez son un conjunto de cargas eléctricas positivas (protones) y negativas (electrones) responsables de dichas atracciones electromagnéticas.

Imaginemos en un cuerpo sólido dos moléculas próximas entre sí, las cuales se encuentran en posiciones fijas de equilibrio. En ellas, las fuerzas internas de atracción y repulsión están equilibradas, es decir, se compensan. Si por algún factor externo que actúe sobre el sólido comenzaran a separarse, las fuerzas internas de atracción tenderían a unir las. Por el contrario, si se aproximaran, las fuerzas internas de repulsión tenderían a separarlas con la finalidad de mantener la posición de equilibrio (Fig. 6.7).

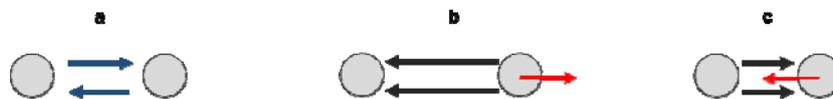


Fig. 6.7: Posición de equilibrio, fuerzas internas de atracción y repulsión compensadas (a). Predominio de fuerzas internas de atracción debido a fuerza externa que tiende a separar las moléculas (b). Predominio de fuerzas internas de repulsión debido a fuerza externa que tiende a aproximar las moléculas (c).

Ahora, imaginemos un resorte sostenido de un extremo sobre el cual colgamos una pesa del otro extremo. Observaremos que el resorte se alarga. Lo que está sucediendo es que sobre

el resorte está actuando una *fuerza deformante*, la pesa. Cuantas más pesas colguemos, más se alargará. Finalmente, si al quitar las pesas el resorte recupera su longitud inicial diremos que su comportamiento es elástico. Así, se define como *cuerpo elástico* aquél que tiene la capacidad de alterar su forma original al actuar sobre él una fuerza deformante, recuperando posteriormente su forma inicial cuando la fuerza deformante deja de actuar (Fig. 6.8).

Pero no todos los materiales son elásticos, no pudiendo recuperar su forma inicial luego de sufrir una deformación. Estos se denominan *cuerpos inelásticos*, como es el caso, por ejemplo, de la plastilina.

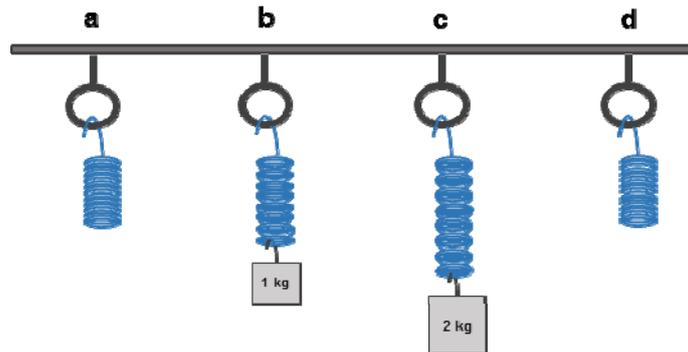


Fig. 6.8: Ejemplo de deformación elástica. Resorte sostenido desde un extremo (a) sobre el cual se colocan pesas desde el otro extremo produciendo alargamientos (b y c). Al quitar las pesas el resorte recupera su longitud original (d).

Cabe destacar que, si aplicamos una fuerza deformante a un material elástico más allá de cierto límite, no recuperará su forma original, permaneciendo deformado.

Es por ello que se han establecido dos límites:

- *Límite elástico*: distancia a partir de la cual se producirá una deformación permanente en el cuerpo deformado.
- *Módulo de ruptura*: distancia a partir de la cual se producirá la ruptura del cuerpo deformado.

De esta forma, todo cuerpo sobre el que actúe una fuerza deformante sin sobrepasar el límite elástico tendrá un *comportamiento elástico*, mientras que aquel que sobrepase el límite elástico sin llegar al módulo de ruptura tendrá un *comportamiento plástico* (Fig. 6.9).

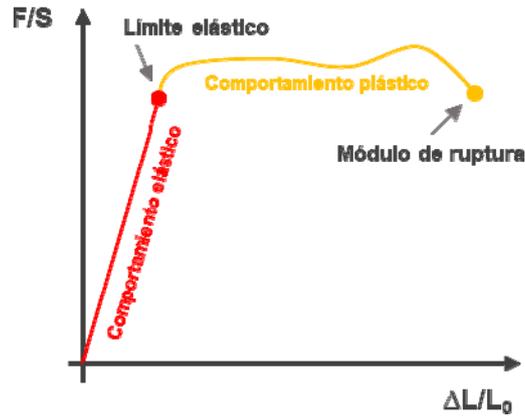


Fig. 6.9: Relación entre el esfuerzo realizado (F/S) y la deformación producida ($\Delta L/L_0$).

Ley de Hooke

En comportamientos de tipo elástico se ha planteado una relación conocida como *Ley de Hooke*, en honor a quien la advirtió, el físico Robert Hooke. La misma sostiene que “*la fuerza externa aplicada es proporcional a la deformación producida*”. Esta ley será válida siempre y cuando la fuerza que actúe sobre el material no supere el límite elástico. Su fórmula es:

$$F = k \cdot \Delta L$$

Siendo, F la fuerza externa aplicada (en N o Dinás), k la constante elástica (en N/m o Dinás/cm) y ΔL la variación de longitud (en m o cm) (diferencia entre la longitud final (L_f) y la longitud inicial (L_0)).

Tipos de deformaciones elásticas

Elasticidad por tracción o tensión

La *tracción* es uno de los casos típicos de deformación elástica. Como ejemplo práctico se puede citar un alambre de acero, material elástico por excelencia. Al ser sometido a una fuerza deformante en dirección de su longitud principal, el alambre se alarga. En este caso, la relación entre fuerza y deformación se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1 \cdot F}{E \cdot S}$$

“La deformación por unidad de longitud es proporcional a la fuerza por unidad de superficie”

Siendo: ΔL : variación de longitud ($L_f - L_0$) en m o cm; L : longitud original, en m o cm; F : fuerza aplicada, en N o Dinias; S : superficie, en m^2 o cm^2 ; E : módulo de Young, en N/m^2 o $Dinas/cm^2$.

Asimismo, debemos aclarar que $\Delta L/L_0$ se conoce como la deformación relativa (ϵ), siendo la razón de la variación de longitud (ΔL) a la longitud inicial (L_0). Esta deformación propiamente dicha se refiere al cambio relativo en dimensiones o forma, de un cuerpo sometido a un *esfuerzo*. Este último, representado con letra sigma (σ), es la relación entre la fuerza (F) aplicada sobre un cuerpo y el área (A) donde esta actúa:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

En el sistema M.K.S. y S.I. sus unidades son las siguientes: $\sigma = N/m^2$; $F = N$; $A = m^2$

Por su parte, el módulo de Young (E), es característico de cada material, siendo su valor dependiente de la composición del mismo. En líneas generales, cuanto mayor es el valor del módulo de Young menos deformable es el material.

A fines prácticos, el módulo de Young representa la fuerza necesaria para que un sólido cilíndrico de sección igual a la unidad, aumente su longitud al doble.

En la siguiente tabla (Tabla 6.2) podemos observar algunos valores de módulo de Young de diferentes sólidos sometidos a una fuerza de tracción.

Tabla 6.2: Módulos de Young en sólidos biológicos ante un esfuerzo de tracción.

	Tracción
Material	Módulo de Young
Fémur de caballo	$23,00 \times 10^9$
Fémur de avestruz	$12,60 \times 10^9$
Cartílago	$0,30 \times 10^9$
Cáscara de Huevo	$0,06 \times 10^9$

**módulo de Young expresado en N/m^2*

Elasticidad por compresión

La compresión es una deformación elástica similar a la tracción, donde las fuerzas deformantes actúan en la dirección de la dimensión principal del material (su eje longitudinal), pero en este caso tienden a producir un acortamiento del mismo. Un ejemplo clásico es el de las columnas, estructuras diseñadas para soportar fuerzas de compresión. Existe un fenómeno que puede ocurrir como consecuencias de dichas fuerzas conocido como *pandeo*, que diferencia a la tracción de la compresión, el cuál mencionaremos más adelante.

Elasticidad por flexión

En este caso, la fuerza deformante tiende a actuar a lo largo del material provocando un alejamiento desde su punto de aplicación. La distancia entre la posición de equilibrio que posee previamente el material y la flexión generada por la fuerza deformante se conoce como *flecha de flexión*.

Podemos observar este tipo de elasticidad en una barra que se encuentra fija por un extremo, por ambos o simplemente apoyada desde los extremos, sobre la que actúan fuerzas deformantes que tienden a flexionarla.

Cuando se produce elasticidad por flexión en algún material, ocurren simultáneamente los fenómenos de tracción y compresión. Mientras los átomos que conforman la parte superior se alargan, los de la parte inferior se comprimen, o viceversa, dependiendo en qué parte actúe la fuerza deformante (Fig. 6.10 a y b).

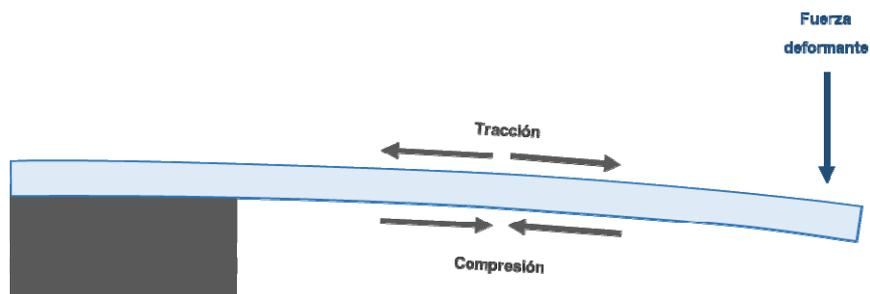


Fig. 6.10a: Trampolín sobre el que actúa una fuerza deformante en el extremo libre produciendo elasticidad por flexión. La parte superior del trampolín se alarga (tracción), mientras que la parte inferior se comprime (compresión).

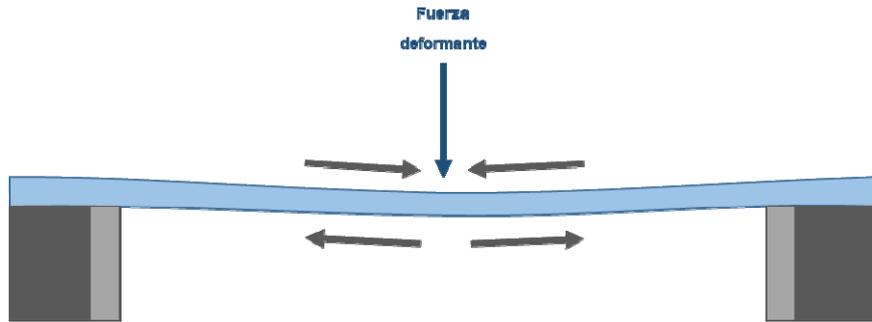


Fig. 6.10b: Tabla sostenida desde sus extremos sobre la que actúa una fuerza deformante en la parte media produciendo elasticidad por flexión. La parte superior se comprime (compresión), la inferior se alarga (tracción).

Elasticidad por cizalladura

La elasticidad por cizalladura, también conocida como elasticidad transversal, es un tipo de deformación elástica producida por fuerzas que hacen que unas capas de material resbalen sobre otras. El esfuerzo tiende a cortar el material (esfuerzo cortante), debido a dos fuerzas opuestas que actúan sobre él (Fig. 6.11).

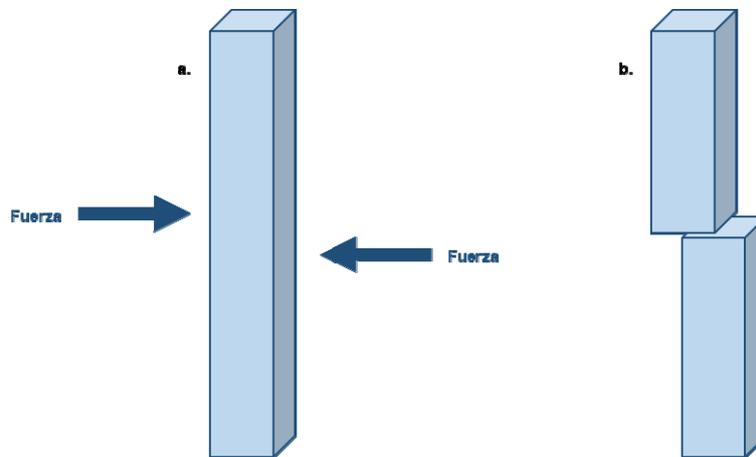


Fig. 6.11: Barra sobre la que actúan dos fuerzas opuestas (a) produciendo una deformación por cizalladura (b).

Elasticidad por torsión

La elasticidad por torsión es un ejemplo típico de cizalladura, en el cual unos planos de material resbalan sobre otros. Por ejemplo, en el caso de una barra que se encuentra sujeta por un extremo, si es sometida por el otro extremo a un par de fuerzas que actúen en sentido opuesto, se tuerce (Fig. 6.12).

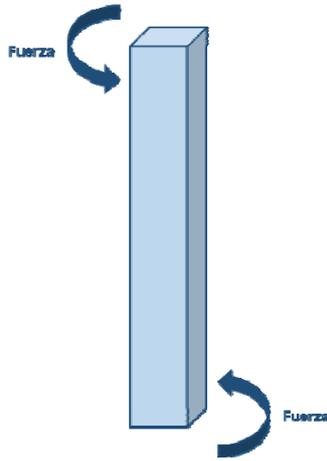


Fig. 6.12. Barra sobre la que actúan dos fuerzas opuestas produciendo una deformación por torsión.

Propiedades de los cuerpos sólidos

Los valores del módulo de Young, del límite de elasticidad y del módulo de ruptura de cada material determinan las propiedades de plasticidad, ductilidad, maleabilidad, fragilidad, tenacidad y dureza. A continuación, definimos cada una de ellas.

Plasticidad

Una *deformación plástica* es aquella que no desaparece una vez que la fuerza deformante deja de actuar, es decir, es irreversible. La fuerza deformante supera el límite de elasticidad del material produciendo una deformación permanente. Es importante señalar que la plasticidad de los materiales está dada por su capacidad de poder deformarse permanentemente, pero sin llegar a romperse. De esta forma, para un material plástico los valores del módulo de Young y del límite de elasticidad son muy pequeños. Un ejemplo típico de material plástico es la plastilina.

Ductilidad

Es una propiedad de algunos materiales que son capaces de admitir importantes deformaciones de tipo plástica y sostenida, sin llegar a romperse. Una característica típica de estos materiales es que ante la acción de una fuerza de tensión longitudinal pueden extenderse formando fibras o hilos. Vale destacar que, esto no significa que no puedan romperse, si no que lo harán luego de sufrir evidentes deformaciones. En los materiales dúctiles, el módulo de Young y el límite de elasticidad no son muy grandes, pero su módulo de ruptura es muy superior a su límite elástico, permitiendo tales deformaciones. Como ejemplos se pueden mencionar a metales como el hierro, cobre y zinc, a la madera, entre otros.

Maleabilidad

Propiedad que presentan aquellos materiales que se pueden trabajar fácilmente, pudiendo deformarse notoriamente sin romperse. A diferencia de los materiales dúctiles, los maleables permiten la formación de delgadas láminas. En ellos, el módulo de Young y el límite de elasticidad necesariamente deben ser pequeños con respecto al módulo de ruptura.

Uno de los metales más maleables es el aluminio, pensemos en las finas láminas de papel aluminio que se utilizan para conservar y cocinar alimentos. Otros ejemplos son oro, plata, cobre.

Fragilidad

Es la propiedad que presentan ciertos materiales que se rompen ante la menor deformación, originando partes de menor tamaño. Así, un material frágil presenta escasa o nula elasticidad, siendo incapaces de recuperar su forma una vez sufrido un esfuerzo. Los valores del límite de elasticidad y módulo de ruptura se encuentran muy próximos. Ejemplos típicos de materiales frágiles son el vidrio, la cerámica, el ladrillo, el diamante.

Tenacidad

Es la capacidad que tienen los materiales para absorber simultáneamente esfuerzos y deformaciones de consideración sin llegar a la ruptura. La tenacidad está asociada a la resistencia, a la energía que los materiales son capaces de absorber sin romperse. Es una propiedad que depende de la constitución de los materiales, de su estructura molecular y de las fuerzas de atracción entre sus moléculas. En estos materiales, los valores del módulo de

Young, límite de elasticidad y módulo de ruptura son muy grandes. Como ejemplos tenemos el cobre, acero, caliza, hormigón armado.

Dureza

Representa la resistencia que ofrece la superficie de los materiales a ser rayados. Es una propiedad física que se encuentra directamente relacionada a la fuerza de unión de las moléculas que componen el material en cuestión.

En mineralogía, esta propiedad se expresa en forma relativa mediante una escala ideada por Friedrich Mohs, conocida como *escala de Mohs*, que va del 1 al 10. Está formada por una serie de minerales de dureza creciente donde cada término de esta escala es rayado por el siguiente y raya al anterior. El número 1 corresponde al talco y el 10 al diamante, siendo los valores intermedios pertenecientes al yeso, calcita, fluorita, apatita, feldespato, cuarzo, topacio y corindón. En el caso particular del diamante, mineral más duro que se conoce, sólo podría ser rayado por otro diamante. Sin embargo, a pesar de su gran dureza, es extremadamente frágil.

Materiales poco deformables (huesos) y muy deformables (músculo)

A nivel orgánico encontramos principalmente dos tipos de materiales sólidos. Los sólidos poco deformables, tal el caso de los huesos y aquellos que, sin perder sus propiedades elásticas, sufren una gran deformación cuando actúan sobre ellos determinadas fuerzas externas (los músculos).

Los huesos se caracterizan por presentar un elevado módulo de Young siendo por tanto poco deformables, resistentes a la fractura y, generalmente, de poco peso.

Analizaremos principalmente a los huesos largos, los cuales pueden ser comparados con "columnas". Si sobre ellas actúan fuerzas centradas de compresión, no se produciría ninguna alteración, pudiendo ser estas fuerzas absorbidas por el material. Pero, si se aplican sobre los extremos, fuerzas de compresión no centradas, se produce lo que se conoce como "*fenómeno de Pandeo*". Este fenómeno consiste en la flexión lateral (pandeo) de la columna, pudiendo llegar a la ruptura por flexión. Además, este fenómeno tiende a ser auto progresivo, ya que la forma resultante luego de un ligero pandeo, será menos resistente que la original. Si no desaparecen las fuerzas externas, el proceso prosigue en general sin interrupción, hasta la destrucción de la columna.

El fenómeno de pandeo puede evitarse o disminuirse colocando en los extremos de las columnas, expansiones. En los huesos largos, estas expansiones se conocen con el nombre de *epifisis* (una en proximal y otra en distal), unidas a una columna central de hueso llamada

diáfisis. La zona central de la diáfisis es, en realidad, un tubo de material óseo resistente que rodea y protege a la médula, favoreciendo a conseguir la igualdad de peso y la máxima resistencia a la flexión (Fig. 6.13).

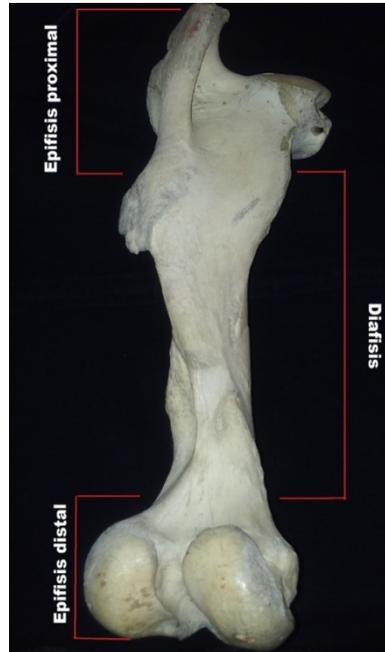


Fig. 6.13: Ubicación de las epifisis y diáfisis en un hueso largo (fémur de equino).

El tejido óseo se caracteriza por ser un tejido duro y se lo puede clasificar en:

- *Tejido óseo compacto*: tejido muy denso, que se encuentra en la periferia del hueso.
- *Tejido óseo esponjoso*: tejido menos denso que el compacto, que se encuentra en el centro del hueso y está formado por finas laminillas óseas que limitan pequeños espacios, por lo que se lo compara con las celdillas de una esponja (Fig. 6.14).

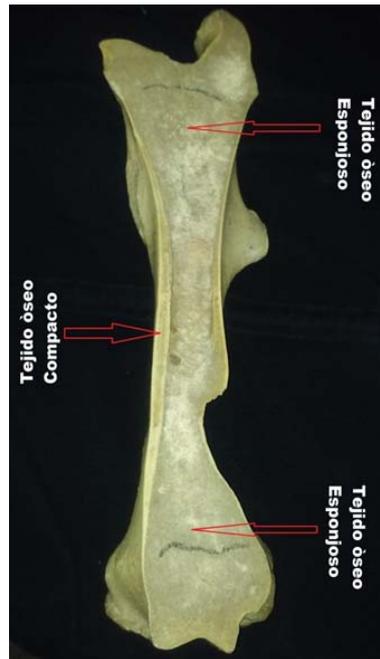


Fig. 6.14: Distribución del tejido óseo compacto y esponjoso en un hueso largo (fémur de equino).

Como dijimos anteriormente, los músculos son el ejemplo típico de materiales sólidos elásticos muy deformables. Gracias a la deformación que experimentan y a la fuerza que ejercen sobre los huesos al contraerse, permiten entre otras cosas el movimiento y desplazamiento de los seres vivos.

El tejido muscular puede ser de dos tipos: muscular estriado y muscular liso. En el primero encontramos, a su vez, el muscular estriado esquelético y el cardíaco.

El músculo estriado esquelético es el músculo más abundante del organismo animal. En los caninos, por ejemplo, la masa muscular representa una importante proporción del peso corporal total, pudiendo alcanzar en la raza galgo hasta un 60%. El tejido muscular está formado por células conocidas comúnmente como fibras musculares, las cuales presentan en su interior una matriz celular denominada sarcoplasma, en la que se encuentran importantes cantidades de iones potasio, magnesio y fosfato, mitocondrias y un extenso retículo sarcoplasmático. Asimismo, el líquido del sarcoplasma sirve de sustento a la gran cantidad de miofibrillas, estructuras contráctiles formadas por filamentos de actina y miosina, determinantes en el proceso de contracción muscular y en brindar al músculo esquelético su aspecto estriado característico, visible microscópicamente.

Filamentos de actina y miosina

En la Figura 6.15 se representa esquemáticamente la organización del músculo estriado esquelético que detallaremos a continuación.

En las miofibrillas, los filamentos de actina y miosina se encuentran dispuestos intercaladamente, lo que determina que éstas posean bandas claras y oscuras.

- Las bandas claras se denominan *bandas I* y están formadas solamente por los filamentos de actina. Estas bandas contienen en su parte media el denominado *disco o línea Z*, desde el cual los filamentos de actina se proyectan en ambas direcciones para intercalarse con los filamentos de miosina.
- Las bandas oscuras se denominan *bandas A* y están formadas por los filamentos de miosina y por los extremos de los filamentos de actina donde éstos se intercalan con los de miosina. Las *bandas A* contienen en su parte media a las *bandas H*, formadas en estado de reposo solamente por los filamentos de miosina.

De esta manera, entre dos *discos Z* sucesivos quedará delimitada la unidad funcional del músculo estriado esquelético denominada *sarcómero*, que abarcará una *banda A* y dos *semibandas I*.

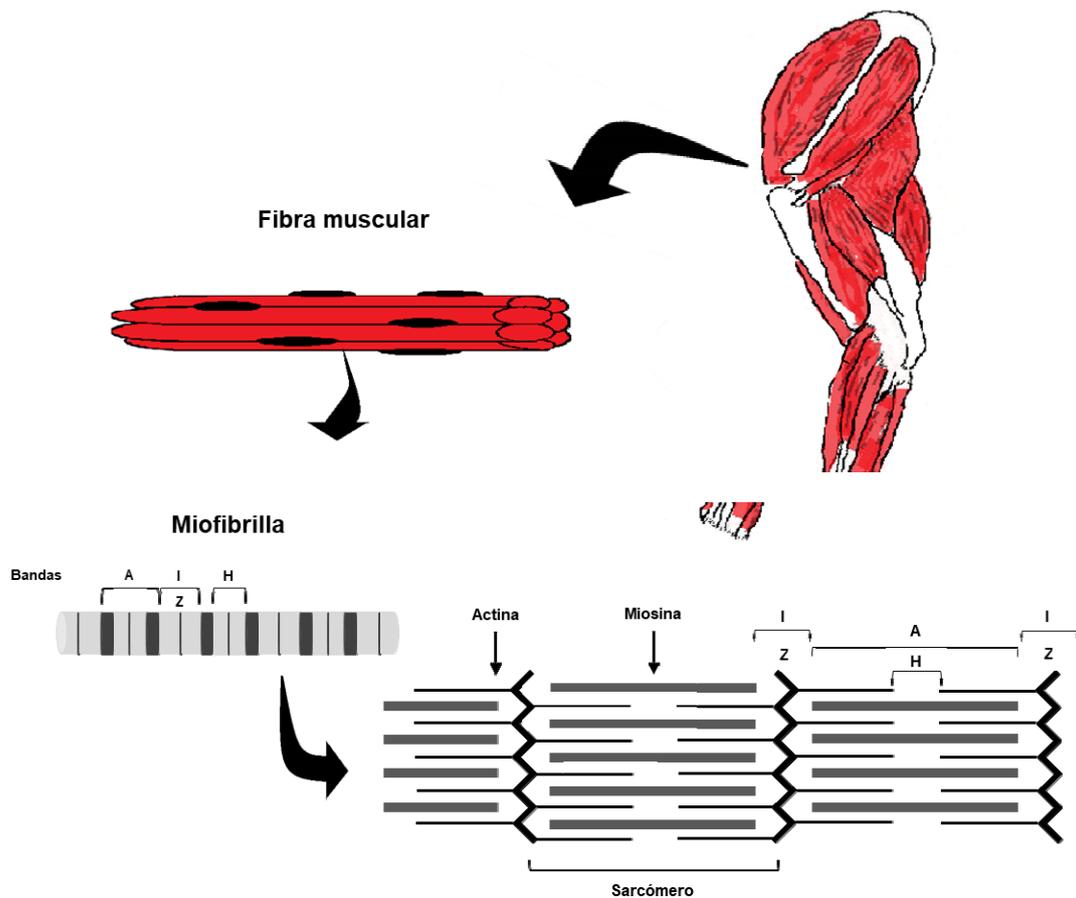


Fig. 6.15: Organización del músculo estriado esquelético. Descripción detallada en el texto.

Biofísica de la contracción muscular

La contracción del músculo esquelético es un proceso caracterizado por un acortamiento de la longitud muscular, por el desarrollo de una fuerza de tracción (tensión) muscular, o por la combinación de ambos. A continuación, describiremos el mecanismo de la contracción con la intención de proporcionar las bases generales del proceso.

1. En primer lugar, como todo tejido excitable del organismo es necesaria la llegada de un potencial de acción que estimule a las fibras musculares a contraerse. Esto es posible gracias a la presencia de nervios motores capaces de transmitir el impulso nervioso hasta sus terminaciones en las fibras musculares.
2. En cada terminación nerviosa se libera una sustancia neurotransmisora conocida como *acetilcolina*, que actúa localmente sobre la membrana de la fibra muscular produciendo la apertura de canales de sodio. Luego de ello, los iones sodio presentes en el exterior de la fibra muscular ingresan masivamente al interior de la misma originando un potencial de acción que se extenderá a lo largo de toda la membrana celular.

3. De esta manera, el potencial de acción generado produce la despolarización de toda la membrana de la fibra muscular. También, gran parte del potencial llegará al interior de la fibra, produciendo la liberación de grandes cantidades de iones calcio desde el retículo sarcoplasmático.
4. Los iones calcio liberados inician el proceso de atracción entre los filamentos de actina y miosina, los cuales por un mecanismo de deslizamiento producirán la contracción muscular.
5. Finalmente, luego de transcurrida una fracción de segundo, los iones calcio son nuevamente transportados al interior del retículo sarcoplasmático mediante una bomba de calcio presente en la membrana del mismo. Allí esperarán almacenados hasta la llegada de un nuevo potencial de acción

Tipos de contracción muscular

El músculo estriado esquelético puede responder a dos tipos de contracciones:

- *Isométrica*. Este tipo de contracción se produce cuando un músculo se contrae, pero manteniendo constante su longitud, es decir, sin acortamiento. Al producirse la contracción, su longitud no varía, sólo cambia su tensión. Un ejemplo sería cuando se intenta desplazar algún objeto. En este caso, el músculo está realizando una fuerza que intenta ser capaz de superar la resistencia que ejerce el objeto (Fig. 6.16).
- *Isotónica*. En este caso el músculo al contraerse cambia su longitud, pero manteniendo constante la fuerza (tensión) que ejerce durante toda la contracción. Un ejemplo sería el levantamiento de un peso. La tensión que el músculo produce al entrar en actividad es suficiente para elevar la carga que se le opone, entonces el músculo se acorta (Fig. 6.17).

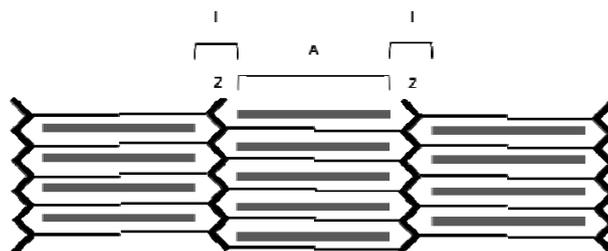


Fig. 6.16: Contracción isométrica. Los filamentos de actina y miosina se tensionan sin producirse acortamiento del sarcómero.

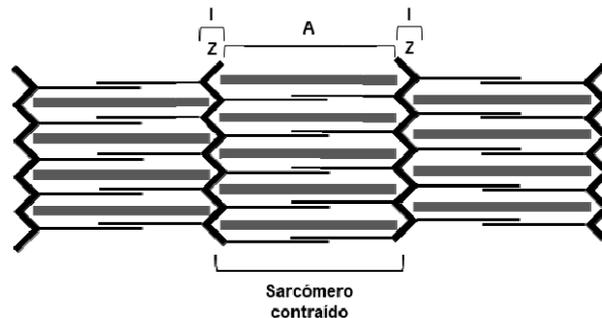


Fig. 6.17: Contracción isotónica. Acortamiento del sarcómero por deslizamiento de los filamentos de actina (negros) por sobre los de miosina (grises).

Biomecánica del cuerpo rígido

Biomecánica: conceptos y definiciones

La Biomecánica es la ciencia que estudia las fuerzas y aceleraciones que actúan sobre las estructuras y órganos de los seres vivos.

En el organismo animal se puede observar un movimiento de tipo mecánico, que consiste en el cambio de posición que experimenta el cuerpo, tomando como punto de referencia ya sea su posición inicial o a otros cuerpos. De allí que, la Biomecánica estudia el trabajo mecánico que realizan los animales mediante la dinámica y estática del cuerpo.

Se divide en *Bioestática* y *Biodinámica*.

- *Bioestática*: Estudia las fuerzas que actúan sobre los seres vivos, en estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme (movimiento en línea recta con velocidad constante). Por ejemplo: el estudio de las fuerzas que actúan cuando un caballo se encuentra de pie.
- *Biodinámica*: Estudia las condiciones y consecuencias de los cambios y movimientos que experimentan los cuerpos. A su vez, se subdivide en:
 - *Biocinética*: Analiza los cambios causados en el movimiento y las fuerzas necesarias para producir esos cambios. Estudia la causa del movimiento, ocupándose de las fuerzas, aceleraciones, la energía y el trabajo. Por ejemplo: el estudio de las fuerzas que actúan en los miembros de un perro mientras corre.
 - *Biocinemática*: Analiza los movimientos, pero sin considerar las fuerzas necesarias para producirlos. Es decir, estudia los cambios de posición que experimentan las diferentes partes del cuerpo en el espacio durante un tiempo determinado. Los movimientos se describen de manera cuantitativa por variables de tipo lineales y

angulares, relacionadas con el tiempo, desplazamiento, velocidad y aceleración. Por ejemplo: el estudio de los movimientos de los miembros del caballo durante el galope.

Inercia

La inercia es una propiedad fundamental de la materia. Toma su origen en la Primera ley de Newton, conocida como *Ley de inercia* o *Principio de inercia*, que afirma que “Todo cuerpo persiste en un estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme a menos que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas aplicadas sobre él”. Es decir que, para que un cuerpo inicie o modifique un movimiento es necesario que adquiera una aceleración, por lo que necesitará que una fuerza externa o una serie de fuerzas cuya resultante no sea cero, sea aplicada sobre él. Por lo tanto, en ausencia de una fuerza, los cuerpos en reposo seguirán estando en reposo y los cuerpos en movimiento se mantendrán en movimiento. Vale aclarar el término *fuerza resultante*, que se refiere al conjunto de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y que serán responsables de vencer el estado de inercia, siempre y cuando la resultante sea diferente de cero.

Un factor determinante de la cantidad de inercia de un cuerpo es su masa. Así, cuanto más masa tenga el cuerpo mayor será la inercia del mismo, por lo que será necesario una mayor fuerza para cambiar su estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme.

Equilibrio

El equilibrio es la situación en la que un cuerpo conserva su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, debido a que las fuerzas que actúan sobre él se compensan y anulan mutuamente.

Equilibrio mecánico

Se dice que varias fuerzas se equilibran o están en equilibrio cuando mutuamente anulan sus efectos. La resultante de las fuerzas que se equilibran es nula, es decir cero. De esta forma, el cuerpo estará en estado de equilibrio (Fig. 6.18).

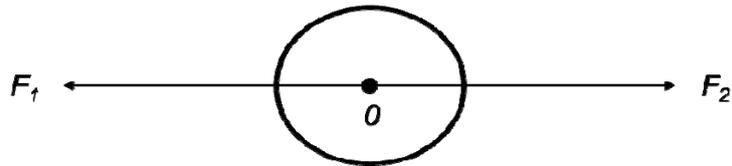


Figura 6.18: Cuerpo circular sobre el que actúan dos fuerzas de igual magnitud en sentido contrario (F_1 y F_2), por lo que mantienen el equilibrio en el punto 0.

En otras palabras, decimos que un cuerpo está en equilibrio mecánico cuando ofrece resistencia sobre otro cuerpo, que es al que se le ha aplicado una fuerza. Esto viene dado por la Tercera ley de Newton que sostiene que “cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro cuerpo, el segundo ejerce sobre el primero una fuerza igual y en sentido contrario”, denominada *fuerza normal*. Por ejemplo: cuando un perro se encuentra de pie empuja la tierra hacia abajo y es empujado al mismo tiempo hacia arriba por la tierra. Es el principio de acción y reacción, donde ambas fuerzas tendrán la misma intensidad, pero dirección opuesta (Fig.6.19).

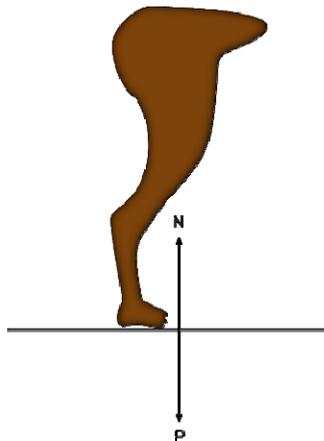


Figura 6.19: Principio de acción y reacción. El peso del animal (P) es contrarrestado por la normal (N).

Centro de gravedad

El *centro de gravedad* de un cuerpo también llamado *centro de masa*, es el punto ubicado en la posición promedio de distribución del peso de ese cuerpo. Asimismo, se puede considerar como el punto de un cuerpo donde actúa, en su totalidad, la fuerza de la gravedad. En los cuerpos simétricos coincide con su centro geométrico, como es en el caso de una pelota de tenis (Fig.6.20).



Fig. 6.20: Ubicación del centro de masa en una pelota de tenis.

Pero si el cuerpo no es simétrico se debe determinar la ubicación del centro de gravedad, ya que la posición del mismo varía según el cambio de forma que experimente ese cuerpo. Por ejemplo, en los humanos el centro de gravedad tendrá diferente ubicación dependiendo de la posición en que se encuentre la persona. Consideremos los siguientes dos casos:

- Persona de pie y derecha. El centro de gravedad se ubicará a nivel de la 2da vértebra sacra sobre una línea vertical imaginaria que se extiende hasta el suelo y cae justo 3 cm por delante del tobillo.
- Persona con los brazos levantados sobre su cabeza. En este caso estará ubicado varios cm por encima de la 2da vértebra sacra.

Esta capacidad que posee el centro de gravedad para variar de posición será de gran importancia para que la persona conserve el equilibrio al estar de pie, caminar, correr o realizar cualquier tipo de actividad deportiva.

Por otro parte, distinto es en el caso de un objeto que se encuentra colgado. Por ejemplo, cuando se suspende una media res desde el corvejón, el centro de gravedad estará debajo del mismo. Para localizarlo es necesario trazar una vertical desde el punto de suspensión y el centro se ubicará en algún lugar a lo largo de esa línea.

Condición de estabilidad

El centro de gravedad es el punto de equilibrio de un cuerpo, siendo la ubicación del mismo importante para la estabilidad. Si se traza una vertical hacia abajo desde el centro de gravedad de un cuerpo y cae dentro de su base, el objeto estará en equilibrio estable. Si cae fuera de la base será inestable. De allí la importancia del tamaño de la base, también llamada apoyo. Así, un cuerpo para estar en equilibrio necesita que su centro de gravedad esté en la línea recta

vertical que pasa por algún punto dentro del área de apoyo. El área de apoyo de una persona viene dada por la posición de los pies. En los animales cuadrúpedos, como los caninos o felinos, el área de apoyo se halla entre las 4 patas, lo que hace que el animal posea una gran condición de estabilidad. En el caso de las aves, contrariamente a lo que sucede en el hombre, el centro de gravedad se ubica debajo de sus caderas.

El centro de gravedad en los animales

En los animales, el estado de equilibrio necesariamente implica que las fuerzas que actúan sobre el cuerpo se distribuyan de manera uniforme. Las cargas de los cinturones (torácico y pélvico) y miembros se aplican a través de los mecanismos de suspensión torácico y pelviano. Estos últimos, permiten a los músculos de las extremidades sostener el cuerpo del animal con mínimo esfuerzo, estabilizando a las mismas para mantener una posición erguida. Así, un caballo puede descansar o incluso dormir estando de pie.

En los animales cuadrúpedos, la constitución del organismo responde al concepto de arco y cuerda. Según ello, la parte encargada de sostener el peso del cuerpo está suspendida por sus extremos mediante un arco conformado por las vértebras dorso-lumbares, sus ligamentos y los músculos espinales, mientras que la cuerda tensora del arco está formada por el esternón, la línea media, los músculos hipoaxiales, grupo psoas y abdominales. Mediante esta disposición se logra que las cargas de tracción, tensión y presión se equilibren en el arco, evitando que todas las cargas recaigan sobre las extremidades.

La distribución de las cargas sobre los miembros está relacionada en primer lugar con la localización del centro de gravedad. La localización de dicho centro tiene su sostén en el tipo de soporte que tiene el animal. Por lo general, se dice que el 60% del peso corporal corresponde a la *parte anterior* y el 40% restante a la *parte posterior*, aproximadamente. Por ejemplo: en un caballo en estación, que se encuentra apoyando sus cuatro miembros, el centro de gravedad se ubica justo por debajo de una línea imaginaria trazada entre el tubérculo mayor del húmero y la tuberosidad isquiática, a la altura de la 14^{ta} costilla.

En la Figura 6.21, los puntos A, B, C, D representan los puntos de contacto entre los pies y el suelo, en una vaca vista desde arriba. Si el centro de gravedad (M) se localiza dentro de ABE, el animal puede bien dejar su pata trasera derecha o izquierda levantadas ya que en ambos casos el tronco está soportado por los pies A, B y C o A, B, y D. Ya que el centro de gravedad cae dentro de dos triángulos en ambos casos. Si el centro de gravedad está dentro del triángulo CDE, el animal puede levantar el miembro anterior izquierdo o el derecho ya que en ambos casos el centro de gravedad estará localizado dentro de BCD o ACD.

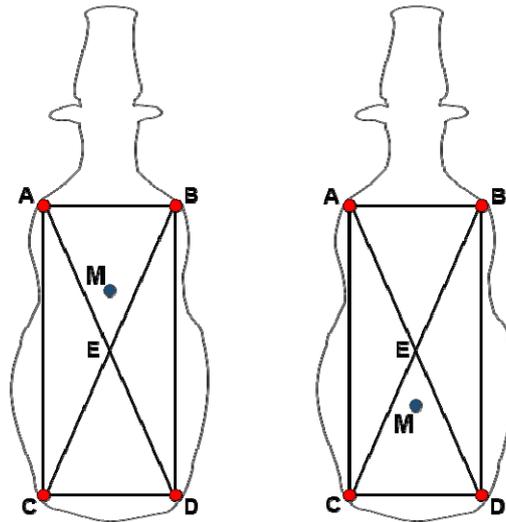


Figura 6.21: Distribución de las cargas sobre los miembros en una vaca según la localización del centro de gravedad. La descripción se detalla en el texto.

Palancas del organismo animal

Por definición, una palanca es una barra rígida que oscila sobre un punto de apoyo denominado *fulcro* debido a la acción de dos fuerzas contrapuestas, la *fuerza potente* y la *fuerza resistente*.

A continuación, se detallan los elementos de una palanca:

- Fp: Fuerza potente, también llamada fuerza motriz o potencia. Corresponde a la fuerza que aplicamos de forma voluntaria con la finalidad de conseguir un resultado.
- Fr: Fuerza resistente, también fuerza de carga o resistencia. Es la fuerza a vencer. Es ejercida sobre la palanca, por el cuerpo a mover.
- Bp: Brazo potente, corresponde a la distancia entre la potencia y el fulcro.
- Br: Brazo resistente, distancia entre la resistencia y el fulcro.
- F: Fulcro, punto de apoyo o eje.

A partir de la ubicación de los diferentes elementos, se pueden encontrar 3 géneros o tipos de palanca:

- Palanca de *Primer género* o *interfija*. El punto de apoyo se encuentra ubicado entre la potencia y la resistencia. De esta forma, si se empuja hacia abajo en un extremo de la palanca se levanta una carga en el otro. Ejemplos de este tipo de palancas son la

tijera, el alicate, la tenaza, el “sube y baja”. En el organismo podemos encontrar esta palanca al levantar la cabeza. Allí, la articulación atlanto-occipital actúa como punto de apoyo, el peso de la cabeza como resistencia y la contracción de los músculos del cuello como fuerza potente (Fig. 6.22).

- Palanca de *Segundo género* o *interresistente*. Aquí la resistencia se encuentra ubicada entre la potencia y el punto de apoyo. De esta manera, para levantar una carga se debe levantar el extremo de la palanca. Como ejemplos se pueden citar la carretilla, el cascanueces, el destapador de botellas. En las personas se puede ver este tipo de palanca en la articulación tibiotarsiana, donde la articulación actúa como punto de apoyo, el peso del cuerpo como resistencia y los músculos extensores de tarso como potencia (Fig. 6.23).
- Palanca de *Tercer género* o *interpotente*. La potencia se encuentra entre la resistencia y el punto de apoyo. Así, la fuerza potente es aplicada en un punto intermedio. Algunos ejemplos son la caña de pescar, el martillo, la pinza de depilar. En los animales tendremos este tipo de palanca en los miembros, como veremos a continuación (Fig.6.24).

En los animales, el mecanismo de palanca es la forma general para realizar cualquier tipo de movimiento músculo esquelético. A nivel de los miembros el tipo de palanca es la *interpotente*, siendo frecuentemente utilizada para calcular los esfuerzos que el animal aplica al caminar.

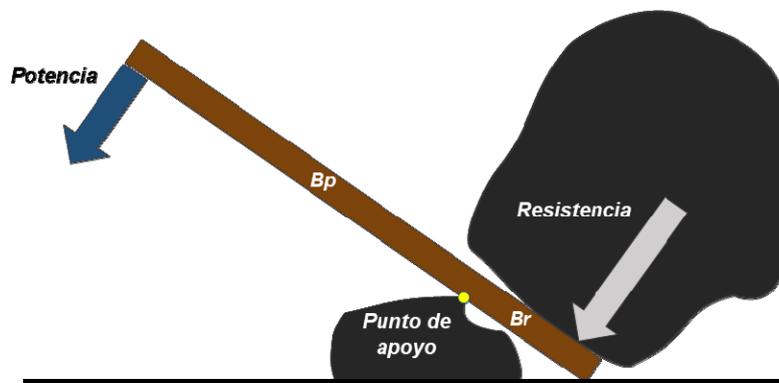


Figura 6.22: Palanca de primer género o interfiija para el movimiento de un objeto de gran peso.
Descripción en el texto.

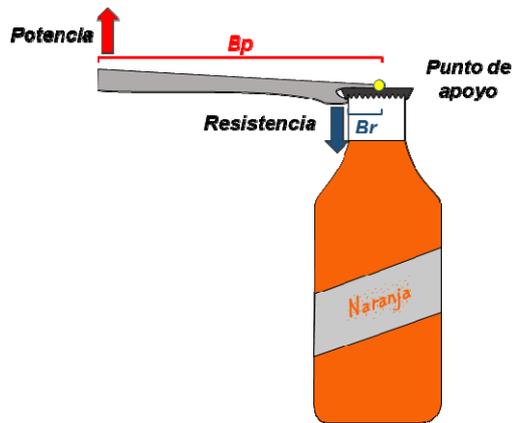


Figura 6.23: Palanca de segundo género o interresistente. Descripción en el texto.

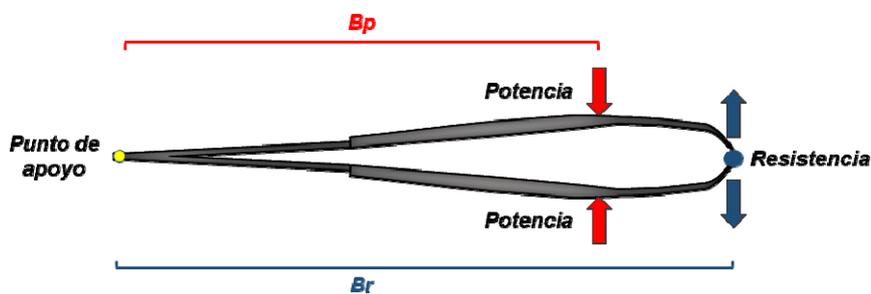


Fig. 6.24: Palanca de tercer género o interpotente. Descripción en el texto.

Palanca del miembro anterior

En los miembros anteriores, a nivel del antebrazo, el sistema de palanca interpotente se compone de la siguiente manera. El punto de apoyo corresponde a la articulación del codo. En la parte anterior del antebrazo se encuentra el brazo potente, que incluye los músculos extensores carporradial y digital común. En posterior del antebrazo se dispone el brazo resistente, correspondiente a los músculos flexores cubital del carpo y cubital lateral (Fig. 6.25).

En la articulación escápulo-humeral se aplica el mismo sistema de palanca. Aquí, la articulación actúa como punto de apoyo, el brazo y antebrazo como resistencia y la contracción del músculo deltoides representa la fuerza potente.

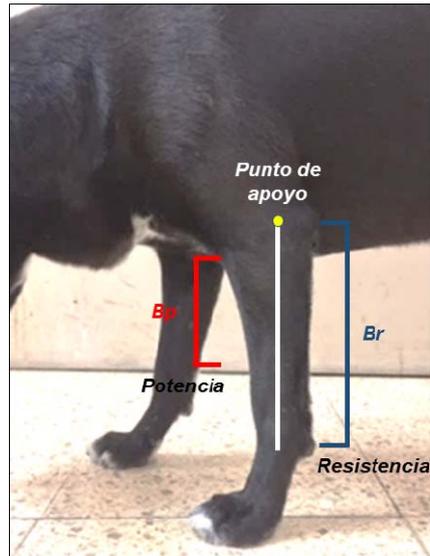


Figura 6.25: Sistema de palanca interpotente en el miembro anterior de un canino. Descripción detallada en el texto.

Palanca del miembro posterior

En este caso, la articulación de la rodilla actúa como punto de apoyo. El brazo potente corresponde al músculo gastrocnemio ubicado en la parte posterior del miembro, mientras que el brazo resistente a los músculos a lo largo de la tibia. (Fig. 6.26). El mismo sistema se aplica a la articulación coxofemoral.

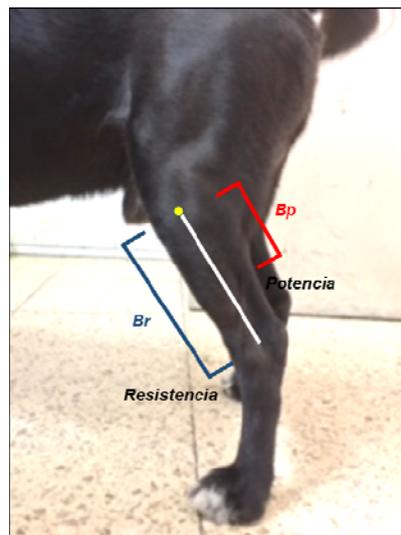


Figura 6.26: Sistema de palanca interpotente en el miembro posterior de un canino. Descripción detallada en el texto.

Referencias

- Cromer, A. H (1996). Capítulo 3: Momento. En A. H. Cromer (Ed.), *Física para las Ciencias de la Vida (2da edición)* (pp. 42-69). Barcelona, España: Editorial Reverté S. A.
- Cromer, A. H. (1996). Sólidos. En A. H. Cromer (Ed.), *Física para las ciencias de la vida (2da edición)* (pp. 226-241). Barcelona, España: Editorial Reverté S. A.
- Frumento, A. S. (1995). Propiedades mecánicas del músculo esquelético. En A. S. Frumento *Biofísica (3ra edición)* (pp. 71-84). Madrid, España: Mosby/Doyma Libros S. A.
- Gonzalez Ibeas, J. (1974). Elasticidad y resistencia de los materiales. En J. Gonzalez Ibeas, *Introducción a la física y biofísica (1ra edición)* (pp. 22-50). España: Editorial Alhambra S. A.
- Guyton, C. A., Hall, J. E. (2001). Capítulo 6: Contracción del Músculo esquelético. En C. A. Guyton y J. E Hall, *Tratado de fisiología médica (10ma edición)* (pp. 79-94). México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Hewitt, P.G (1999). Primera ley del movimiento de Newton: inercia. En P. G. Hewitt. *Física conceptual (3ra edición)* (pp.43-55). México: Addison Wesley Longman, Inc.
- Hewitt, P.G (1999). Tercera ley del movimiento de Newton: acción y reacción. En P. G Hewitt. *Física conceptual (3ra edición)* (pp. 74-82). México: Addison Wesley Longman, Inc.
- Hewitt, P.G (1999). Máquinas. En P. G. Hewitt *Física conceptual (3ra edición)* (pp. 111-114). México: Addison Wesley Longman, Inc.
- Hewitt, P.G (1999). Sólidos. En P.G Hewitt. *Física conceptual (3ra edición)* (pp. 260-274). México: Addison Wesley Longman, Inc.
- Hewitt, P. G (1999). Temperatura, calor y expansión. En P.G. Hewitt. *Física conceptual, (3ra edición)* (pp. 315-323). México: Addison Wesley Longman, Inc.