Rev. Esp. de Cir. Ost., 19, 291-299 (1984)

Trabajo. Energía

Dra. C. ZARAGOZA

Siguiendo como en los números anteriores para terminar en el próximo, se recogen unas nociones fundamentales de Física Aplicada de utilidad para conocimiento y recuerdo de traumatólogos y ortopedas para que, con su uso, se le dé una mayor precisión a las ideas de sus trabajos. Estos temas, como los anteriores, han sido redactados por la profesora ZARAGOZA RUVIRA, *titular de Física de la Facultad de Medicina de Valencia.*

I. Concepto de trabajo

Se denomina *trabajo* realizado por una fuerza que actúa sobre un cuerpo, desplazándolo, al producto escalar de la fuerza por el desplazamiento producido. La existencia de un desplazamiento es imprescindible para la realización de un trabajo, en Física, pero no lo es en la vida cotidiana. Desde el punto de vista físico, no se realiza ningún trabajo al sostener un peso, ni al mantener un muelle contraído, ya que son situaciones estáticas; el trabajo se realiza mientras se levanta o se baja el peso, o mientras se va comprimiendo el muelle.

Sin embargo, al realizar un esfuerzo muscular, se puede hablar de un trabajo muscular, ya que es necesario un aporte energético para mantener la contracción del músculo.

Si la fuerza $\vec{F}$ que actúa sobre un cuerpo lo desplaza una distancia $\vec{s}$, el trabajo realizado por la fuerza será (fig. 6-1):

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

El trabajo es una magnitud escalar, de módulo:

$$W = F\, s \cos \alpha$$

equivalente al producto de la componente de la fuerza en dirección paralela al desplazamiento, por el valor del desplazamiento.

El trabajo será máximo cuando $\vec{F}$ y $\vec{s}$ sean paralelos ($\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$) y nulo cuando sean perpendiculares ($\alpha = 90°$, $\cos \alpha = 0$). En ausencia de fuerzas de fricción, un cuerpo se desplaza sobre una superficie horizontal si un realizar ningún trabajo.

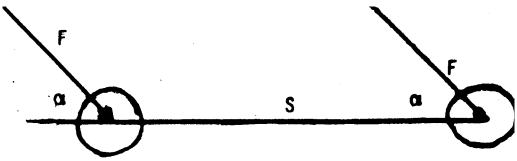

FIG. 6.1.– Trabajo de una fuerza. .

La unidad de trabajo en el S.I. es el Julio (J). Por definición:

$$1\ J = 1\ N \cdot 1\ m$$

El N.m también se utiliza para medir el momento de una fuerza. Sin embargo, por tratarse de magnitudes físicas muy distintas, se mantiene la denominación de N.m para el momento de una fuerza y J para el trabajo. En el sistema c.g.s., la unidad de trabajo es el ergio, siendo

$$1\ erg = 10^{-7}\ J$$

Máquinas simples

Dr. C. ZARAGOZA

I. Generalidades

Las máquinas simples son dispositivos destinados a multiplicar la fuerza. Las máquinas y sus leyes son bien conocidas, y hasta hace algunos años ocuparon un lugar destacado en los textos de Física General. Sin embargo, hoy en día el estudio de las máquinas simples ha quedado reducido al estudio de casos particulares de sistemas en equilibrio.

Este modo de proceder tiene una justificación muy sencilla: las leyes generales del equilibrio, que se deducen de las leyes de Newton, incluyen, como caso particular, las leyes de las máquinas simples, pero no a la inversa. Por ejemplo, consideremos una palanca, en la cual aplicamos una fuerza F, situada a una distancia d_F del punto de apoyo, para equilibrar una resistencia R, situada a una distancia d_R (fig. 7-1). La ley de la palanca establece, como veremos que «Potencia por su brazo es igual a resistencia por el suyo», lo que es equivalente a afirmar que el momento de la potencia es igual al momento de la fuerza.

Si, gracias a esta palanca, conseguimos mediante una fuerza pequeña F equilibrar una fuerza grande R, se cumplirá, obviamente, que F es mayor que R, luego $F + R \neq 0$. Para que el sistema esté en equilibrio hemos de tener en cuenta una tercera fuerza, que es la reacción del punto de apoyo. Esta tercera fuerza no se tiene en cuenta en la teoría de las máquinas simples, si bien es muy importante en la práctica.

Para estudiar las máquinas simples podemos adoptar dos procedimientos alternativos:

– Aplicar las leyes generales del equilibrio: suma de fuerzas nula y suma de momento nulo, teniendo en cuenta las fuerzas de reacción en el punto de apoyo.

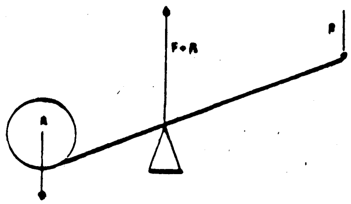

FIG. 7.1.– La palanca permite desplazar una resistencia.

– Aplicar directamente las leyes correspondientes, teniendo en cuenta que estamos ignorando unas fuerzas de reacción que están presentes en el sistema.

II. Parámetros característicos de las máquinas simples

En una máquina simple, aplicamos una fuerza F para equilibrar una resistencia, R. Se llama *ventaja mecánica* de la máquina al cociente:

$$V\,M = \frac{F\ \text{conseguida}}{F\ \text{aplicada}} = \frac{R}{F}$$

Este cociente será mayor que 1 si $R > F$ o menor que 1 si $R < F$.

En todas las máquinas se cumplirá la ley de conservación de la energía; esto es, el trabajo realizado sobre el sistema será igual al trabajo conseguido más las pérdidas por rozamiento. En general:

$$W_{\text{aplicado}} = W_{\text{conseguido}} + \text{pérdidas}$$

Si el trabajo aplicado se realiza cuando la fuerza F se desplaza una distancia x_F y se consigue trabajo cuando la resistencia R se desplaza una distancia x_R, se cumplirá:

$$F\,x_F = R\,x_R + \text{pérdidas}$$

En el caso de una máquina ideal, en la que no hubiera pérdidas por rozamiento, se tendría:

$$F\,x_F = R\,x_R$$

con lo que la ventaja mecánica de esta máquina (en este caso *ventaja mecánica ideal)* sería:

$$V\,M\,I: \frac{R}{} = \frac{x_F}{x_R}$$

Si la ventaja mecánica era mayor que 1, la fuerza F conseguía igualar el efecto de la fuerza mayor R, pero ejerciendo un desplazamiento x_F mayor que el correspondiente de la resistencia x_R.

Otro concepto útil a la hora de evaluar las máquinas simples es el de *rendimiento* o *eficacia*. Este concepto es más general y se aplica en todos los campos de la Física. En general, se llama rendimiento de un sistema (máquina simple o no) al cociente entre el trabajo conseguido y el trabajo aplicado:

$$\text{rendimiento} : \frac{\text{trabajo conseguido}}{\text{trabajo aplicado}}$$

Por ejemplo, el rendimiento del cuerpo humano como una máquina que transforma energía química de los alimentos en trabajo mecánico es aproximadamente del 15 por 100.

III. Tipos de máquinas simples

Podemos agrupar las máquinas simples en tres grandes grupos:

1. Palancas, que incluye las palancas propiamente dichas, el torno y las poleas.
2. El plano inclinado, que incluye la cuña y el tornillo.
3. La prensa hidráulica.

De todos estos tipos de máquinas simples estudiaremos exclusivamente las palancas, por su aplicación a las palancas óseas, las poleas, por su utilidad en cinesiterapia, y la prensa hidráulica que veremos en el capítulo de hidrostática.

Palancas

Se denomina palanca a una barra rígida que puede pivotar sobre un punto llamado fulcro. A una distancia d_R actúa una fuerza, R, la resistencia, cuyo efecto queremos contrarrestar aplicando otra fuerza, F, la potencia, en un punto a una distancia d_F del fulcro. La ley de la palanca establece la igualdad de momentos de potencia y resistencia

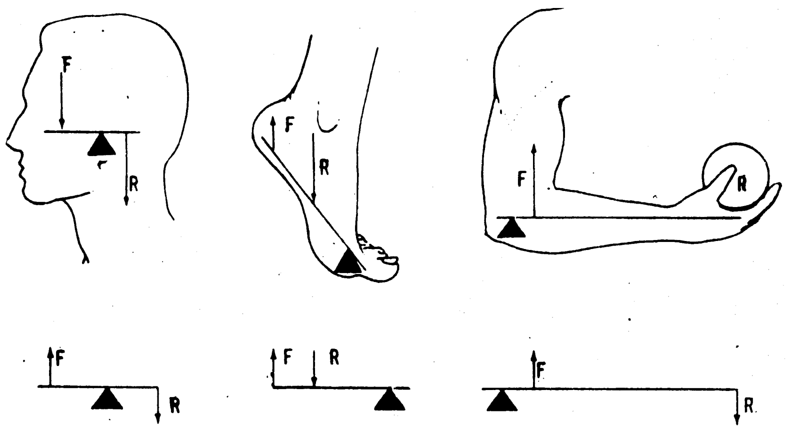

FIG. 7.2.– Tipos de palancas.

respecto al fulcro, y se puede expresar como:

$$F\ d_F = R\ d_R$$

La ventaja mecánica vendrá medida por el cociente $R/F = d_F/d_R$.

La palanca es una máquina ideal sin rozamientos, y por tanto, su eficiencia es del 100 por 100.

Las palancas se clasifican en tres géneros, según sean las posiciones relativas de resistencia, potencia y fulcro.

En las palancas de primer género, el fulcro está situado entre la potencia y la resistencia. La ventaja mecánica será mayor o menor que 1, según sean las correspondientes distancias de potencia y resistencia.

En las palancas de segundo y tercer género, el fulcro está situado en un extremo de la barra. En la de segundo género, la posición intermedia está ocupada por la resistencia, y la potencia se ejerce en el otro extremo. La ventaja mecánica será mayor que 1. En la de tercer género, la potencia está entre la resistencia y el fulcro, con lo que la ventaja mecánica será siempre menor que 1.

Poleas

Una polea es una máquina simple compuesta por un disco que gira alrededor de un eje central, y va provisto, a lo largo de la circunferencia externa, de un canal alrededor del cual se adapta un cable o un elemento de tracción.

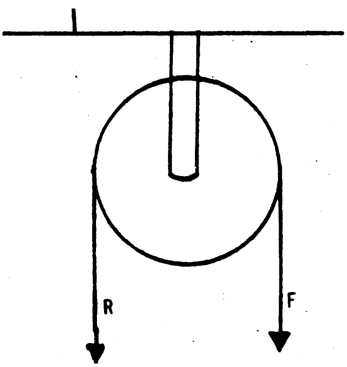

FIG. 7.3.– Polea fija.

Una polea fija (fig. 7-3) sirve únicamente para cambiar la dirección de una fuerza. Para elevar un peso R hay que ejercer una fuerza F = R, siendo la ventaja mecánica igual a 1. Las poleas se utilizan con este fin en los sistemas de tracción, ya que así se consigue ejercer una misma tensión en dos o más direcciones diferentes gracias a la acción de una misma fuerza (fig. 7-4).

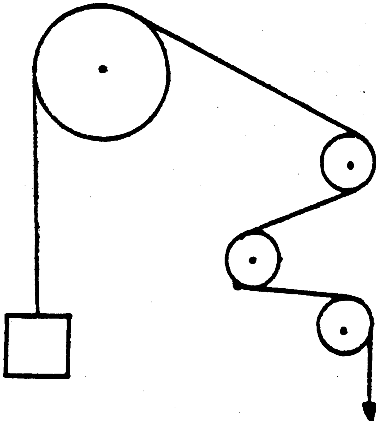

FIG. 7.4.– La tensión es la misma en todos los puntos.

En el caso de una polea móvil, tal como la de la figura 7-5, la resistencia R cuelga de dos cables, uno fijo al techo y otro que sujetamos nosotros. La fuerza R se divide en

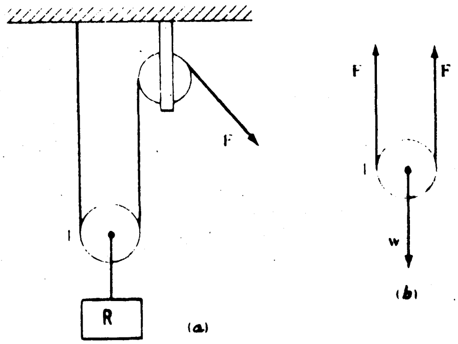

FIG. 7.5.– Polea móvil.

dos fuerzas iguales, luego la fuerza ejercida F será R/2. La segunda polea, fija, sólo sirve para cambiar la dirección de R. La ventaja mecánica será de 2.

Con las poleas se pueden construir dispositivos más complicados, llamados polipastos. Se puede demostrar que la ventaja mecánica es igual al número de cables que sujetan la carga. Por ejemplo, en el dispositivo de la figura 7-6, la ventaja mecánica sería 4; esto es, con una fuerza de 10 Kp se pueden levantar 40 Kp. Pero para que el peso R se eleve 1 cm, se ha de acortar en 1 cm cada uno de los cuatro cables que lo sujetan, luego la fuerza F ha de recorrer 4 cm.

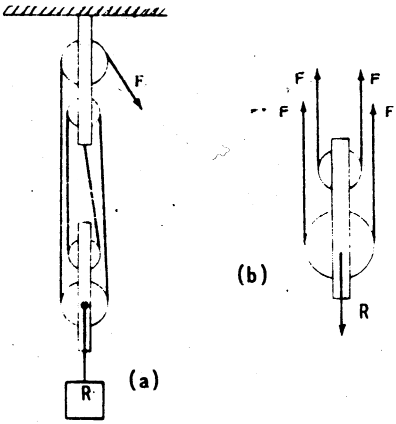

FIG. 7.6.– Sistema de cuatro poleas.

IV. Palancas óseas

Las palancas óseas son modelos que utilizamos para explicar el trabajo muscular.

Por ejemplo, consideremos el caso de la figura 7-7, con la mano que sostiene un peso, el antebrazo en ángulo recto con el brazo, de modo que la muñeca y la mano estén completamente rígidas. Podemos suponer, en una primera aproximación, que el peso R está equilibrado por la fuerza muscular F_m ejercida por el bíceps.

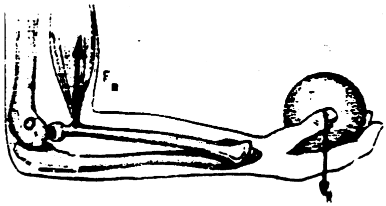

FIG. 7.7.– El antebrazo como una palanca.

Si suponemos que ambas fuerzas actúan sobre un eje rígido, cuyo punto de apoyo es la articulación del codo, el sistema es equivalente a una palanca cuyos elementos son:

– potencia: la fuerza muscular F_m

– resistencia: el peso que sostiene la mano (al que habría que añadir el peso del antebrazo y de la mano).

– fulcro: la articulación del codo.

Tal como está diseñada esta palanca, es una palanca de tercer género, con ventaja mecánica menor que 1: la fuerza muscular será mayor que la fuerza aplicada. Puesto que la distancia codo-mano es unas 10 veces mayor que la distancia codo-punto de inserción del biceps, la fuerza muscular será unas 10 veces mayor que la fuerza que sostiene la mano.

Al estudiar los sistemas musculares como sistemas de palancas, hay que tener presente que estamos haciendo varias simplificaciones:

– Suponemos que la fuerza que se opone a la resistencia es única, esto es, se debe únicamente a un músculo o grupo de músculos. En el caso anterior, hemos partido de la base de una muñeca perfectamente rígida, que actúa como continuación del antebrazo.

– Aplicamos las leyes de la palanca olvidando la primera condición de equilibrio que exige que la suma de las fuerzas que intervienen en el sistema sea cero. Para conseguir una fuerza neta nula, hemos de tener en cuenta la reacción del punto de apoyo, que puede llegar a ser muy importante, como veremos en el ejemplo siguiente.

V. Aplicaciones

Consideremos el caso de una persona de 70 Kp inclinada hacia delante en ángulo de

30°, que lleva en las manos un peso de 10 Kp (fig. 7-8). El peso del tronco, la cabeza, las extremidades superiores y el peso adicional de 10 Kp constituyen la resistencia que tiene que igualar la potencia desarrollada por los músculos de la espalda, que

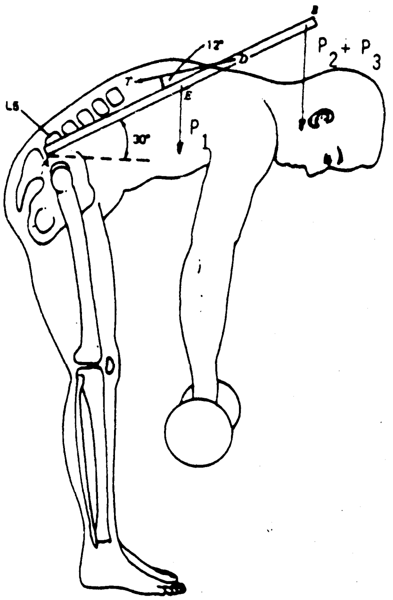

FIG. 7.8.– Fuerzas sobre la columna.

se pueden suponer condensados en el «erector spinae». La columna se puede suponer como un eje rígido articulado en la articulación lumbo sacra (L 5).

Las fuerzas presentes en esta palanca son:

P_1 = peso del tronco = 40 por 100 del peso total = 28 Kp.

P_2 = peso de cabeza y extremidades superiores = 20 por 100 del peso total = 14 Kp.

P_3 = peso añadido = 10 Kp.

La fuerza P_1 está aplicada en el punto medio entre la cabeza y la articulación lumbo-sacra; si esta distancia es L, el punto de aplicación de P_1 estará en L/2.

La fuerza P_2 y P_3 se articulan en el extremo de la «palanca», a una distancia L.

La resistencia, formada por una fuerza P_1 de 28 Kp a una distancia de L/2 y una fuerza $(P_2 + P_3)$ a una distancia L será equivalente a una resistencia única, de módulo $P_1 + P_2 + P_3 = P$ aplicada a una distancia x tal que:

$$P_1\,(L/2) + (P_2 + P_3)\,L = P\,x$$
$$28\text{ Kp}\,(L/2) + 24\,L = 52\,x$$
$$x = 0\text{'}73\,L$$

La potencia que equilibra a esta resistencia se debe a los músculos dorsales,que se insertan a una distancia de 2L/3, formando un ángulo de 12° con la columna vertebral, y por tanto de 18° con la horizontal.

La componente vertical de F compensa la fuerza total, vertical, aplicada en x

$$(2/3)\,F_y = 0\text{'}73\,.\,52\text{ Kp}$$
$$F_y = 57\text{ Kp}$$

y por tanto,

$$F = F_y / \text{sen } 18° = 184\text{ Kp}$$

La fuerza muscular ejercida por los músculos de la espalda en un hombre de 70 Kp en esta posición y condiciones es de 184 Kp, es decir, más de dos veces y media su propio peso.

Para completar el estudio veamos cuál es la reacción en el punto de apoyo, esto es, en la quinta vértebra lumbar.

Llamando R a dicha reacción y escribiendo las condiciones generales de equilibrio:

$$F_x = 0$$
$$F_y = 0$$

se verifica

$$R_x = -\,F_x = 175\text{ Kp}$$
$$R_y = P + F_y = 52\text{ Kp} + 57\text{ Kp} = 109\text{ Kp}$$
$$R = 206\text{ Kp}$$

Esta reacción es aproximadamente el triple del peso.

II. Potencia

Llamaremos *potencia* al trabajo realizado en la unidad de tiempo:

$$Pot = \frac{W}{t}$$

La unidad de potencia es el J/s, que se llama watio (w).

El Kilowatio también será unidad de potencia, y el Kilowatio.hora será una unidad de trabajo, equivalente a:

$$1 \text{ Kw h} = 1000 \frac{J}{s} \cdot 3600 \text{ s} = 3'6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Cuando la fuerza F constante que actúa sobre un tiempo t sobre un móvil, haciendo que éste se desplace una longitud x, realiza un trabajo:

$$W = F x$$

y la potencia será:

$$Pot = \frac{F x}{t} = F c$$

La potencia también se puede expresar como el producto de la fuerza aplicada por la velocidad. Este enunciado parece contradictorio, puesto que una fuerza, por la ley de Newton, va a producir una aceleración, y no un movimiento uniforme. Sin embargo esto no es cierto más que en el caso ideal, en que no hay rozamiento. Por ejemplo, para mantener un vehículo moviéndose a velocidad constante, el motor ha de realizar un trabajo. La potencia consumida será el producto de la fuerza aplicada por la velocidad del vehículo.

III. Energía

Se denomina *energía* a la capacidad que presentan los cuerpos de realizar un trabajo. Energía y trabajo son conceptos diferentes: la energía es una propiedad de los cuerpos que tienen una energía, mientras que el trabajo es una manifestación de la energía: los cuerpos no «tienen trabajo» sino que realizan un trabajo.

Al ser el trabajo la expresión de la existencia de una energía, ésta viene medida en unidades de trabajo, y su unidad en el S.I. será el Julio. Si el cuerpo considerado está en una situación inicial con energía U_i y pasa a otro estado con energía U_f, realizando un trabajo W (trabajo realizado por el cuerpo sobre él por un agente externo) se cumplirá:

$$U_f - U_i = W$$

Distinguiremos dos tipos de energía:

– energía cinética, la energía debida al movimiento.

– energía potencial, que puede ser debida a la presencia del cuerpo en un campo de fuerzas o a un trabajo realizado sobre el mismo.

Energía cinética

Un cuerpo de masa m, que se mueve con velocidad v, tiene una *energía cinética,* o de movimiento, ya que, al frenarse, puede realizar un trabajo. Es el caso, por ejemplo, de un proyectil que choca con un blanco. La energía cinética de traslación vale:

$$E = 1/2 \; m \; v^2$$

y la de rotación

$$E = 1/2 \; I \; w^2$$

para un cuerpo que gira con velocidad angular w siendo I su momento de inercia respecto al eje considerado.

Un cuerpo que se mueve con velocidad constante, tendrá una energía cinética constante. Si realizamos un trabajo sobre el cuerpo, ejerciendo una fuerza a lo largo de su trayectoria, aumenta su velocidad, y, por tanto, su energía cinética. El cuerpo también puede realizar trabajo, por ejemplo, cuando un proyectil llega a un obstáculo y lo atraviesa, disminuyendo su velocidad y su energía cinética. En el primer caso, el trabajo exterior aplicado es igual al aumento de la energía cinética. En el segundo, el trabajo realizado por el cuerpo sobre el entorno es igual a la disminución de su energía cinética.

Energía potencial gravitatoria

Cualquier cuerpo situado en un campo

de fuerzas, esto es, en una región del espacio donde está sometido a la acción de una fuerza, tenderá a desplazarse por la acción del campo. Al desplazarse, realizará un trabajo. Si puede realizar trabajo, tiene cierta energía, que se llama *energía potencial.*

Si, en el campo gravitatorio, elevamos una masa m, inicialmente en reposo, a una altura h, realizamos un trabajo igual a mgh. El cuerpo queda en reposo en la posición elevada, pero ha adquirido una energía potencial, ya que si cae al punto de partida, llegará a él con una cierta velocidad, y, por tanto, con una energía cinética que no tenía anteriormente. La diferencia entre los valores de la energía potencial gravitatoria entre dos puntos viene medida por el trabajo realizado (por un agente externo si el cuerpo pasa a una posición más elevada, o por la misma fuerza gravitatoria si el cuerpo cae) para llevar el cuerpo de un punto a otro. El trabajo, y, por tanto, la diferencia de energía potencial gravitatoria, depende exclusivamente de las posiciones inicial y final, y no de la trayectoria seguida (fig. 6-2).

$W = m\,g\,h$

Para poder tomar valores absolutos de la energía potencial hay que tomar arbitrariamente un nivel de referencia, esto es, un punto cuya altura sea nula. En cada caso se toma como referencia el punto que más interese, puesto que es prácticamente imposible tomar una referencia universal.

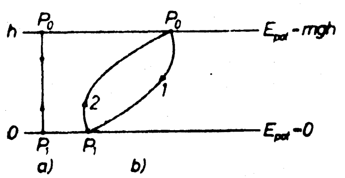

FIG. 6.2.– El trabajo gravitatorio no depende de la trayectoria.

Energía potencial elástica

Para reducir la longitud de un muelle, hemos de aplicar una fuerza F constante, igual a la resistencia que opone a la deformación, a lo largo de una trayectoria A (fig. 6-3). Esto supone ejercer un trabajo sobre el muelle. El trabajo queda almacenado en el muelle, en forma de *energía potencial elástica.*

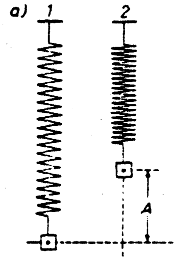

FIG. 6.3.– Energía potencial elástica.

Si liberamos bruscamente el muelle, éste vuelve a su posición original, realizando un trabajo.

IV. Principio de conservación de la energía mecánica

Consideremos un cuerpo, inicialmente en un estado 1, con velocidad v_1 y energía potencial $m\,g\,h_1$, que, por la acción exclusiva de la fuerza de la gravedad, pasa a un estado 2, con velocidad v_2 y energía potencial $m\,g\,h_2$. El trabajo realizado por las fuerzas gravitatorias será:

$W = m\,g\,(h_1 - h_2)$

que es la diferencia entre los valores de la energía potencial; por otra parte, este agente externo, el campo gravitatorio, aumenta la energía cinética, luego también se cumplirá:

$W = 1/2\ m\,v_2^2 - 1/2\ m\,v_1^2$

Igualando ambas expresiones tenemos:

$m\,g\,(h_1 - h_2) = 1/2\ m\,v_2^2 - 1/2\ m\,v_1^2$

$1/2\ m\,v_1^2 + m\,g\,h_1 = 1/2\ m\,v_2^2 + m\,g\,h_2$

El primer término es la energía mecánica total en el punto 1, y el segundo término la correspondiente al punto 2.

De un modo general, podemos afirmar que en un sistema mecánico aislado en el que únicamente actúe la fuerza gravitatoria, la energía total se mantiene constante. Este resultado se conoce como Principio de Conservación de la Energía Mecánica.

El que la suma de la energía cinética y la potencial sea una constante, no significa que lo sea cada una de ellas por separado. Consideremos, por ejemplo, el caso de un saltador de pértiga, que empieza a correr, antes del salto, hasta alcanzar una velocidad máxima al pie del listón (fig. 6-4). En la posición (1) la energía cinética es máxima, y la

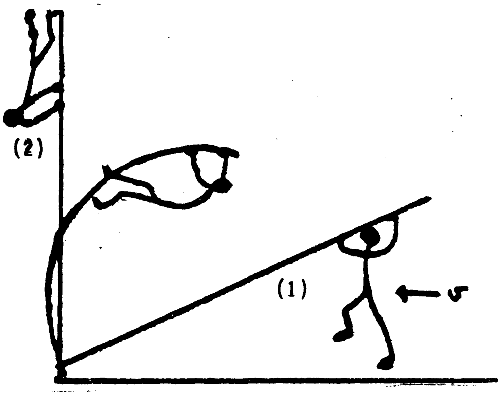

FIG. 6.4.– Conversión de energía cinética en potencial.

energía potencial (respecto del suelo del estadio) es nula. A medida que se eleva, pierde velocidad y gana altura: disminuye su energía cinética y aumenta su energía potencial. Cuando llega al punto más alto, en la posición (2) toda su energía cinética inicial se ha transformado en energía potencial: la energía cinética es cero y la potencial máxima.

La importancia del principio de conservación de la energía en Mecánica merece algunos comentarios:

1.– En las situaciones reales, siempre se presentan fuerzas dispativas que convierten la energía mecánica en otras formas; de energía, ccmo calor, ruído, etc. Estas pérdidas de energía mecánica se pueden reducir a un mínimo, pero no se pueden anular. La energía mecánica no se conserva en estos casos, sino que se transforma en otros tipos de energía, y se puede hablar de un Principio de conservación de la Energía total.

2.– Además de una energía cinética y una energía potencial, los cuerpos poseen una *energía interna,* debida al movimiento de agitación térmica de sus constituyentes (partículas, moléculas, átomos). Esta energía interna no figura en las ecuaciones mecánicas ya que permanece constante mientras la temperatura (que no se considera en Mecánica) no varíe.

3.– En muchos casos, el principio de conservación de la energía se completa con un llamado «principio de conservación de la energía y la masa». Esto se debe a que, en ciertos procesos a nivel atómico o nuclear, se observa que la energía puede materializarse dando lugar a una partícula (en realidad a un par partícula-antipartícula) o que la masa se transforma en energía. La ecuación de Einstein:

$$E = m c^2$$

nos permite establecer una relación entre masa y energía. Sin embargo, hay que tener presentes los límites de validez, tanto de la mecánica de Newton, como de los principios de la Física Atómica.