

TEMAS DE FÍSICA

MECÁNICA DEL CAMINAR.

ALBERTO J. CORTÉS

Depto. de Física y Química. Escuela de Formación Básica.
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario
Av. Pellegrini 250. CP 2000. Rosario. Argentina. Correo Electrónico: cortes@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Los conceptos mecánicos involucrados en una actividad tan cotidiana como el caminar, pueden resultar un buen ejemplo en la enseñanza de la Física básica.

Se discuten los conceptos de rozamiento presentes, la influencia del tipo de calzado, la inclinación del terreno y otros factores. Se analizan los conceptos de torques y variación de momento angular total de sistemas de partículas que conducen al balanceo de los brazos, teniendo en cuenta además su comportamiento como osciladores forzados. Se estudia la estabilidad. Se consideran los trabajos y variaciones energéticas en juego.

ABSTRACT

Mechanical concepts involved in such an everyday activity as walking may be a good example in basic Physics teaching.

Friction concepts are discussed, as well as shoes' type, slope of path and other factors' incidence. Torques and angular momentum variation for systems of particles leading to arms' oscillation are analyzed. Their behaviour as forced oscillators is also taken into account. Stability is studied. Work and energy aspects are also considered.

INTRODUCCIÓN.

Un aprendizaje significativo de la Física requiere ejemplos de aplicación de los conceptos teóricos tan cercanos como sea posible a la realidad cotidiana del alumno, permitiéndole comprobar su utilidad para explicar fenómenos familiares y verificar la validez de dichos principios.

Una de las actividades más comunes que realizamos, y por eso mismo incorporada y automatizada sin mayor reflexión, es el andar.

Su análisis, que esbozaremos a continuación, puede por ello ser un buen ejemplo a discutir en cursos de Mecánica.

EL ROZAMIENTO.

En una versión simplificada del caminar, podemos considerar que, al dar un paso, adelantamos un pie, y lo apoyamos, ejerciendo con él a continuación una fuerza de roce F_r sobre el

piso dirigida hacia atrás (Fig.1).

La reacción F_r' a esta fuerza, ejercida por el suelo sobre nuestro cuerpo, es la que nos acelera hacia delante, al comenzar a caminar; o bien la que equilibra a la resistencia del aire si el

desplazamiento es a velocidad constante.

F_r y F_r' son evidentemente fuerzas cuya magnitud graduamos a voluntad, en función de parámetros tales como el viento (intensidad y dirección) y la pendiente.

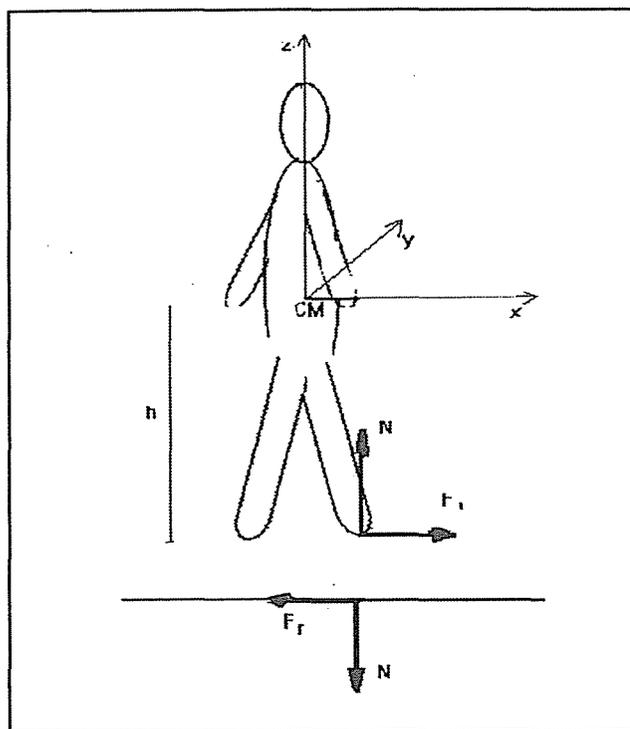


Figura 1.

Sin embargo, por ser fuerzas de rozamiento estático, su valor máximo está acotado superiormente por la cantidad $\mu_e N$, donde μ_e es el coeficiente de roce estático y N la normal.

Por ello, cuando caminamos por un piso resbaladizo (μ_e bajo), lo hacemos con cautela, es decir ejerciendo una fuerza F_r pequeña, para estar seguros de no superar el rozamiento máximo permitido. Otro tanto sucede cuando la que presenta un valor reducido es la normal. Por ejemplo, al caminar por superficies inclinadas, como veremos luego.

En el extremo opuesto, si deseamos correr, lo que implica usualmente mayores valores de F_R en cada paso, nos aseguramos de emplear un calzado que tenga buen agarre con el suelo, es decir, alto μ_e .

La propia naturaleza del movimiento se encarga de mejorar esta condición de seguridad: mientras un pie ejerce la fuerza F_R , levantamos el otro para avanzar a su vez. Ésto permite que todo el peso del cuerpo descansa sobre el

primero, maximizando la normal, y por lo tanto el rozamiento estático máximo.

Los alpinistas son deportistas que frecuentemente caminan sobre superficies con gran inclinación. Si la normal N es simplemente $N = P \cos \beta$ (con β =ángulo de inclinación de la pendiente), el riesgo de deslizamiento es alto. Para reducir ese peligro, emplean dos estrategias:

a) Llevan μ_e a valores muy altos (por ejemplo mediante zapatos con clavos);

b) Incrementan N por encima de $P \cos \beta$, usando sogas dispuestas en direcciones tales que una componente de la tensión, sea normal a la superficie de apoyo del alpinista (Fig.2).

EL BALANCEO DE LOS BRAZOS.

Utilicemos un sistema de tres ejes coordenados para estudiar el movimiento, con el origen en el CM de la persona, el eje x en la dirección y sentido del caminar, y hacia la izquierda y z hacia arriba (Fig. 1).

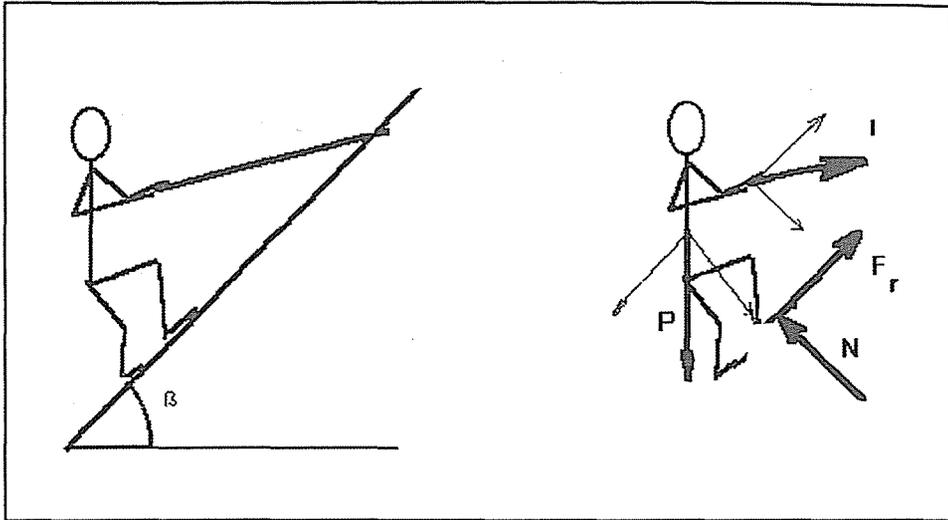


Figura 2.

Notamos que al dar un paso con el pie izquierdo, por ejemplo, la fuerza F_r' , no está aplicada en el CM, sino desplazada una distancia d hacia la izquierda y otra h por debajo del mismo (Figs. 1 y 3).

Este desplazamiento produce dos torques: Uno en la dirección del eje z (de módulo $F_r' \cdot d$),

y otro en la de y (de intensidad $F_r' \cdot h$).

Analicemos primero el momento vertical. Notamos que se trata de un torque periódico, es decir que no es constante en el tiempo, pero se repite a intervalos regulares (paso por medio), llamados **períodos**. Además invierte su sentido a cada paso, al cambiar el pie que ejerce la fuerza.

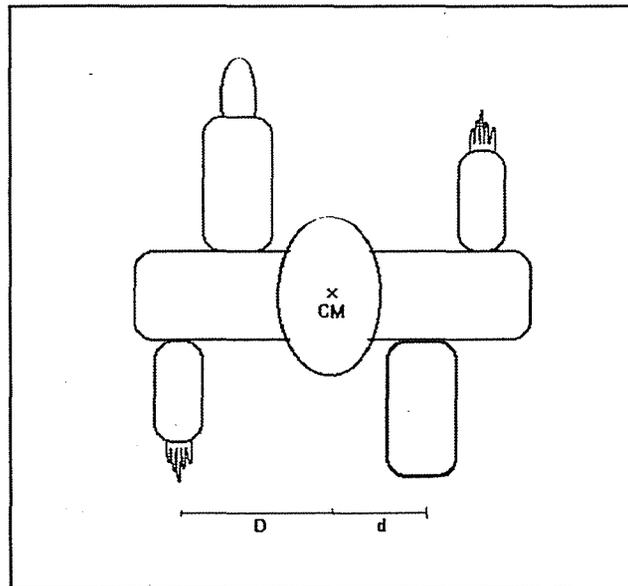


Figura 3.

Teniendo en cuenta la ecuación:

$$M_{CM} = dL_{CM}/dt$$

y en particular su componente z :

$$M_{CMz} = dL_{CMz}/dt$$

dicho momento debería provocar una variación de L_{CMz} , que además cambie de signo con cada paso. ¿Cómo se manifiesta esto?

Hay tres maneras de absorber, compensar o manifestar el efecto de ese torque (en orden creciente de comodidad corporal):

- a) Caminar rotando el tronco sobre un eje vertical hacia un lado y hacia el otro alternativamente.

b) Ejercer, mediante los músculos, huesos y tendones de la pierna apoyada, un momento de torsión, de sentido contrario al producido por F_r' , para que $\Sigma M_{CMz} = 0$.

c) Balancear los brazos, moviendo el derecho en el igual sentido que el pie izquierdo y viceversa. De este modo, la variación del momento angular es casi totalmente variación de I_z de los brazos, dado que (el centro de masa de) cada brazo se desplaza alternativamente hacia adelante y atrás (Fig. 4).

Sabemos, por la experiencia cotidiana, que la tercera es la forma en que habitualmente

caminamos, realizando el movimiento de brazos en forma inconsciente. Sin embargo, si por ejemplo llevamos las manos en los bolsillos, caminamos como se indica en b). Esta forma de andar es más cansadora, por el esfuerzo adicional de torsión que deben realizar las piernas.

También podemos balancear uno solo de los brazos. Esta situación es una combinación de b) y c).

Si movemos ambos brazos, pero llevamos un bulto pesado en una mano, este brazo se moverá a menor velocidad que el otro, implicando sin

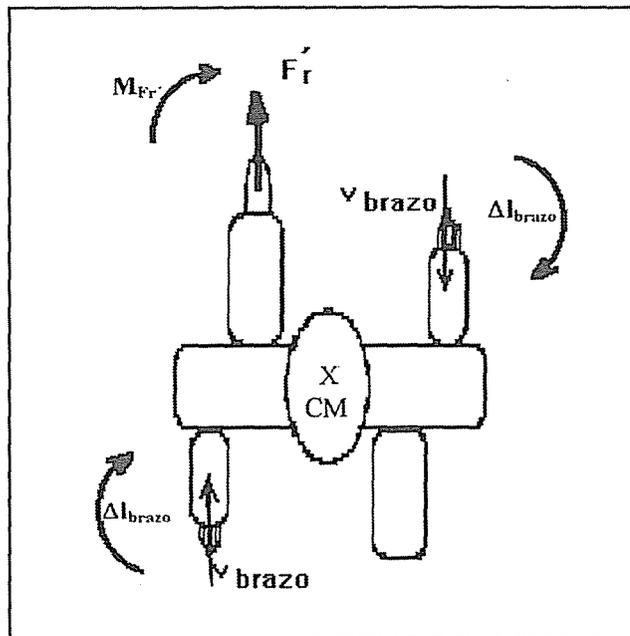


Figura 4.

embargo similar variación de momento angular, dado su mayor momento de inercia.

Por otro lado, si una persona optara por comenzar a caminar de la más incómoda de las tres maneras, es decir a); a menos que deliberadamente mantenga ambos brazos pegados al tronco con un esfuerzo especial, ocurrirá que la propia rotación oscilante del tronco se transmitirá a los brazos y (si éstos pueden girar libremente sobre el eje y , a la altura de los hombros), se irá pasando naturalmente al caso c).

La variación de L_y , debida al movimiento pendular de un brazo se compensa por simetría, es decir, en cada instante:

$$\Delta L_{y\text{brazo izquierdo}} = -\Delta L_{y\text{brazo derecho}}$$

y por lo tanto:

$$\Delta L_{y\text{total}} = 0.^1$$

¹ En todo este análisis está implícita la modelización de la parte superior del cuerpo como tres rígidos articulados: El tronco (incluida la cabeza) y los dos brazos. Hemos omitido estudiar las variaciones de momento angular (componentes y y z) de las piernas. En realidad, éstas tienen comportamientos similares a los brazos en lo referente al eje y ($\Delta L_{y\text{pierna izquierda}} = -\Delta L_{y\text{pierna derecha}}$); y las componentes L_z tienen un funcionamiento exactamente opuesto al de los brazos, lo cual enfatiza aún más la necesidad del balanceo de los brazos u otro de los mecanismos descritos para compensar. De todos modos, y a pesar de ser las masas y longitudes de las piernas superiores a las de los brazos, el hecho de ser $d > D$, confiere a los miembros superiores mayor efectividad como portadores de momento angular por unidad de masa y de velocidad.

LOS BRAZOS COMO OSCILADORES.

Se puede considerar a cada brazo como un péndulo físico, es decir como un rígido que puede rotar sobre un eje horizontal (que pasa por el hombro) y que, debido a la gravedad tiene una posición de equilibrio estable (el brazo cayendo verticalmente hacia abajo). Si dejamos los músculos relajados, cualquier apartamiento del brazo de esa posición de equilibrio conduce a un movimiento pendular (oscilatorio).

Dado que al caminar dicha oscilación es alimentada permanentemente por la fuerza periódica del rozamiento a través del mecanismo antes descrito, se trata de un **oscilador forzado**.

Un oscilador de este tipo presenta un comportamiento óptimo cuando la frecuencia del estímulo externo (la frecuencia de los pasos) coincide con la frecuencia natural o propia del oscilador (resonancia). Dicha frecuencia natural aumenta a su vez al disminuir la distancia entre el punto de sustentación y el centro de masa del rígido oscilante.

Cuando corremos, logramos una mayor velocidad por dos mecanismos:

- a) aumentando la longitud de cada paso;
- b) incrementando la frecuencia de nuestros pasos, en un porcentaje que varía según la rapidez con que corramos.

Para que el movimiento de los brazos acompañe con la mayor comodidad ese aumento de frecuencia, se hace necesario reducir la longitud efectiva de los brazos. Es por ello, que en carrera, los doblamos (Kane-Sterheim, 1998), y lo hacemos más cuánto más rápido corramos.

ESTABILIDAD.

Veamos ahora qué ocurre con el torque o momento (respecto al CM) generado por el roce en la dirección del eje y , o sea el momento que tiende a volcarnos hacia atrás.

Si despreciamos momentáneamente el efecto de la resistencia del aire a nuestro movimiento, sólo nos queda la fuerza peso como posibilidad para generar un torque opuesto que impida la rotación sobre el eje horizontal. Dado que el rozamiento genera un momento en el sentido positivo de y , se requiere otro en sentido negativo, es decir que el centro de gravedad (donde

podemos considerar aplicada la fuerza peso) deberá estar por delante de una vertical que pase por el centro de nuestra base de sustentación.

Ahora bien, normalmente F_r y F_r' son muy inferiores en módulo al peso. Por lo tanto, para equilibrar el torque de la fuerza de roce, el peso necesita un brazo de palanca mucho más pequeño. Es por ello que habitualmente no advertimos ese desplazamiento del centro de gravedad hacia delante. Sin embargo, cuando los valores de F_r y F_r' aumentan la inclinación del cuerpo hacia delante se vuelve perceptible (Esto ocurre, por ejemplo, al avanzar contra el viento, al empujar algún objeto con alto rozamiento con el piso como un ropero o al caminar en la arena seca).

CAMINAR EN UN DÍA VENTOSO.

Consideremos el efecto de la resistencia del aire: Esta fuerza se opone al movimiento relativo de la persona respecto al aire, y su valor aumenta con la velocidad.

Al caminar en aire en reposo su valor depende solamente de nuestra velocidad (además de factores tales como nuestra vestimenta, forma y dimensiones del cuerpo). Es por ello que se requiere la presencia permanente de la fuerza F_r' , aún cuando caminemos a velocidad constante.

Si en cambio nos movemos contra un viento, dicha fuerza aumentará su valor y nos obligará a recurrir a mayores valores de F_r' para avanzar.

Por el contrario, si caminamos a favor del viento, la resistencia del aire nos ayuda y se reducen los valores de F_r' requeridos para avanzar a cierta velocidad. Puede ocurrir que se anulen completamente, caso en el cual el movimiento de los pies se limita a permitir el desplazamiento hacia adelante de nuestra base de sustentación para garantizar la estabilidad. Si la fuerza del viento es aún mayor, se invierte el sentido de las fuerzas de rozamiento (nos frenamos con los zapatos).

La resistencia del aire, si bien está distribuida por toda la **superficie** del cuerpo (tal como el peso se distribuye en todo el **volumen**), se puede considerar aplicada en un punto llamado centro de presión, cuya ubicación exacta depende de la dirección del viento, forma del cuerpo y la vestimenta, etc. Por simplicidad consideraremos que se ubica muy próximo al centro de gravedad

(aunque éste está, por lo general, dentro del volumen del cuerpo, mientras que el centro de presión está en la superficie).

LA ENERGÍA.

Sabemos que caminar una distancia grande es cansador, aún cuando lo hagamos a velocidad constante, en un plano horizontal y en aire calmo; muy a pesar de la Primera Ley de Newton. ¿A qué se debe ésto?

El trabajo de la fuerza de rozamiento en los zapatos es teóricamente nulo, ya que no hay desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza (mientras un pie apoya en el suelo no desliza respecto a éste, a menos que arrastremos los pies). Sin embargo, las fuerzas disipativas (rozamientos) en las articulaciones del cuerpo y la resistencia del aire² generan trabajos de fuerzas no-conservativas (trabajos negativos) que tienden a reducir la energía mecánica total. En el caso de caminar por una playa con arena seca, se agregan además grandes trabajos de la fricción interna del suelo por deslizamiento de unos granos sobre otros.

Para que la energía mecánica se mantenga constante, se hace menester que existan trabajos positivos de otras fuerzas no-conservativas que compensen a los primeros y permitan mantener $E = \text{cte}$.

Pero, si la fuerza de roce que deliberadamente hacemos sobre el suelo no realiza, en principio, trabajo: ¿Cómo se provee la energía necesaria para mantener el andar?

Si tenemos en cuenta que el trabajo puede ser también realizado por un momento que barre un ángulo, podremos comprender que el torque realizado por los músculos de las piernas, al rotar sobre el tobillo (en torno al eje y), es el encargado de esa faena (Fig. 5), resultando:

$$W = \int M_{\text{muscular}} \cdot d\theta.$$

El trabajo de una fuerza no-conservativa expresa siempre la transformación de energía no-mecánica en mecánica ($W_{\text{NC}} > 0$) o viceversa ($W_{\text{NC}} < 0$).

En este caso el trabajo de las fuerzas disipa-

² Además de los pequeños apartamientos a nivel de los zapatos de esa situación ideal de deslizamiento nulo

tivas representa la energía cinética que se convierte en calor o energía interna; y el muscular, la energía química (originada en última instancia en los alimentos) que se transforma en cinética. En un paso a velocidad constante por un plano horizontal, ambas son iguales. Mientras reducimos la marcha está predominando el primero, y al acelerar el segundo. Naturalmente que si el camino posee inclinación hay que considerar también la variación de la E_p gravitatoria.

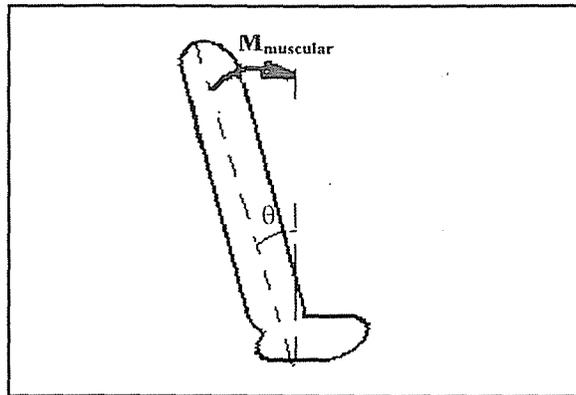


Figura 5.

BIBLIOGRAFÍA.

- Armenti Jr.A. (Ed), *Physics of Sports*. Springer Verlag, NY, 1992.
- Kane, J.W.-Sterheim, M.M., *Fisica*. Editorial Reverté, Barcelona, 1998.
- Li .Y, Wang-W, Crompton RH,- Gunther M.M., "Free vertical moments and transverse forces in human walking and their role in relation to arm-swing". *J Exp Biol*. 2001 Jan; 204(1) : 47-58.
- Rodgers M.M., "Dynamic foot biomechanics". *J Orthop Sports Phys*, 1995 Jun; 21(6) : 306-16.
- Thordarson D.B., "Running biomechanics", *Clin. Sports Med*. 1997 Apr; 16(2) : 239-47.