



CINEMÁTICA O DINÁMICA

Biomecánica Deportiva

Apuntes de Clase

$$F = \Delta p / \Delta t = m \Delta v / \Delta t$$

Por:

Gustavo Ramón S.*

* Doctor en *Nuevas Perspectivas en la Investigación en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte* (Universidad de Granada).

Docente – Investigador del Instituto Universitario de Educación Física, Universidad de Antioquia (Colombia).

Correo: gusramon2000@yahoo.es



CINÉTICA o DINÁMICA

La rama de la biomecánica que estudia el movimiento y las causas que lo producen es la **dinámica o cinética**.

El estudio de la dinámica y de la cinética está centrada en la fuerza, como la causa que produce los movimientos. El estudio de la dinámica es por tanto el estudio de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo para producir movimiento. En algunas ocasiones, aunque sobre un cuerpo estén actuando varias fuerzas no se produce movimiento, en este caso, aparece la *estática*, como rama de la dinámica que estudia los cuerpos sometidos a fuerzas que están en equilibrio.

CINETICA LINEAL

Para el actual capítulo, sólo se estudiarán los movimientos causados por fuerzas que producen sobre el cuerpo una trayectoria rectilínea, de donde se deriva el nombre de cinética lineal.

La fuerza es un concepto usado para describir la *interacción* entre un objeto y su medio ambiente. Puede ser definida como un agente que produce o tiende a producir un cambio en el estado de reposo o de movimiento de un objeto. Así por ejemplo, un balón de fútbol colocado sobre la grama permanecerá en ese sitio a menos que alguien le aplique una fuerza por medio de un puntapie y entonces el cambiará de posición y de velocidad. En otro caso, un ciclista que rueda por una pista a una velocidad de 30 Km/h tenderá a permanecer en esa velocidad, a menos que el ejerza una fuerza sobre los pedales para cambiar su velocidad.

Desde el punto de vista físico, todas las fuerzas son ejercidas por interacciones y repulsiones de cargas nucleares. A este tipo de fuerzas se les denomina fuerzas sin contacto.

Brancazio (1984) divide las fuerzas en dos grupos : fuerzas de contacto y fuerzas sin contacto. En el primer grupo se encuentran todas las fuerzas ejercidas por un objeto sobre otro, como en el caso de la fuerza del aire, la fuerza muscular, la fricción. En el segundo caso, está la fuerza de la gravedad, la fuerzas electrónicas, etc.

La fuerza es un vector que tiene magnitud, dirección y sentido. Para determinar la fuerza resultante sobre un cuerpo se deben utilizar los procedimientos del álgebra vectorial. Para esto remitimos al lector al capítulo inicial donde mostramos ejemplos para tales casos.

Newton (1642-1727) definió la relación entre fuerza y movimiento mediante tres leyes que son conocidas como las leyes del movimiento. Estas leyes son : la ley de la inercia (I Ley), la ley de la aceleración (II Ley) y la ley de la acción y reacción (III Ley).

PRIMERA LEY O LEY DE LA INERCIA

Todo cuerpo tiende a permanecer en estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo mientras no sea obligado a cambiar su estado por aplicación de fuerza externas sobre él.

De acuerdo a esta ley, siempre se requiere una fuerza para iniciar un movimiento, para pararlo o para cambiar su dirección o su velocidad. De la misma manera, es necesario definir los conceptos de inercia y de masa para aclarar esta ley:

INERCIA : Propiedad de los cuerpos de conservar el estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme. Es directamente proporcional a la masa o a la cantidad de movimiento (mv).

MASA : es la cantidad de materia que contiene un cuerpo. Representa la resistencia de los cuerpos a la aceleración lineal. ($m = F/a$).

CANTIDAD DE MOVIMIENTO o MOMENTO LINEAL : es la fuerza que adquieren los cuerpos en virtud de su masa y de su velocidad . ($p = m*v$) (Kg* m/s).

De acuerdo a estos dos conceptos, dos cuerpos con igual masa (5 Kg) que se mueven a diferente velocidad (2 m/s y 3 m/s) tienen diferente inercia. Para el primero, su cantidad de movimiento es de 10 Kgm/s mientras que para el segundo es de 15 Kgm/s. Para alterar la inercia de cada uno de estos cuerpos se requieren fuerzas diferentes.

De acuerdo a esta ley, cuando un cuerpo unido a una cuerda se hace girar, una vez la cuerda se suelte, el cuerpo continuará viajando en línea recta. El ejemplo típico es el lanzamiento de martillo; una vez el martillista suelte el martillo, este se moverá en línea recta porque en el plano horizontal no actúa ninguna fuerza.

Por el contrario, siempre que un objeto viaje en línea curva, deberá existir una fuerza que siempre esté cambiando su trayectoria rectilínea.

II LEY DE NEWTON o LEY DE LA ACELERACION

El cambio de momento de un cuerpo es proporcional a la fuerza aplicada y tiene la dirección en la cual actúa la fuerza o la resultante de las fuerzas aplicadas.

El término momento (p) describe la cantidad de movimiento que posee un cuerpo y se define por el producto de su masa (m) por su velocidad (v) :

$$p = mv$$

El cambio de su momento puede ser escrito como :

$$\Delta p / \Delta t = \Delta (mv) / \Delta t$$

Debido a que Δm no es aplicable al cuerpo humano puesto que la masa siempre permanece constante, entonces, de acuerdo a la segunda ley de Newton, la fuerza aplicada (F) es proporcional a la velocidad del cambio de momento :

$$F = \Delta p / \Delta t = m \Delta v / \Delta t$$

pero $\Delta v / \Delta t$ es el equivalente de la aceleración (a), por lo que la segunda ley se escribe también :

$$F = ma$$

SEGUNDA LEY de NEWTON O LEY DE LA FUERZA

Ley de la masa o Ley fundamental de la dinámica

La aceleración que adquiere un objeto por la acción de una fuerza constante no equilibrada es directamente proporcional a dicha fuerza y tiene la misma dirección y sentido que ella ($F = m \cdot a$).

Esta ecuación es la expresión algebraica de la segunda ley de Newton. Conceptualmente, es una relación causa-efecto. El término del lado izquierdo de la ecuación representa la causa porque representa la interacción entre un sistema y su medio ambiente. En contraste, el término de la derecha revela el efecto porque indica el efecto cinemático de las interacciones sobre el sistema.

La fuerza puede ser entonces definida como la acción de impulsión o tracción que modifica el estado de los cuerpos.

La fuerza se expresa en Newtons¹. Un Newton es la fuerza que al ser aplicada sobre una masa de un kilogramo le produce una aceleración de 1 m/s^2 :

$$F = m \cdot a$$
$$1\text{N} = 1\text{Kg} \cdot 1 \text{ ms}^{-2}$$

TERCERA LEY o LEY DE LA ACCIÓN Y REACCIÓN

Cuando dos objetos físicos interactúan, las fuerzas de interacción son iguales y opuestas (la misma magnitud pero sentido contrario).

Esto implica que la fuerza ejercida por un cuerpo sobre otro es contrarRestada por una fuerza que el segundo cuerpo ejerce sobre el primero. Esta ley enfatiza que la fuerza representa una interacción entre un objeto y su medio circundante. Por ejemplo, un jugador de baloncesto al realizar un salto, ejerce una fuerza contra la tierra y la tierra responde con un fuerza de reacción sobre el saltador. Según la tercera ley, la consecuencia de estas fuerzas es una aceleración experimentada por cada cuerpo dependiendo de sus masas. Si el promedio de fuerza fuese de 1.500 N y el jugador tuviera una masa de 75 kg , entonces el jugador debió estar sometido a una aceleración de 20 m/s^2 ($1.500 \text{ N} / 75 \text{ Kg}$). Debido a la gran masa de la Tierra, la aceleración experimentada por ella debe ser imperceptible ($1.500 \text{ N} / \text{masa de la Tierra} = 1500 \text{ N} / 6 \cdot 10^8 \text{ toneladas}$).

FUERZAS SIN CONTACTO :

Las fuerzas que obran sin estar de por medio el contacto entre los cuerpos son las fuerzas asociadas con los componentes de los núcleos de los átomos y que son debidas a la gravedad.

Newton caracterizó la gravedad en la ley de la gravitación :

¹ Existen otras unidades de Fuerza como lo son el Kilopondio (Kp) que se consideraba como la fuerza que al actuar sobre una masa de 1 Kg le produce una aceleración de 9.8 m/s^2 .

LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL Dos objetos físicos cualesquiera, se atraen con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

$$F = G * m_1 * m_2 / r^2$$

$$G = 6.67 * 10^{-8} \text{ din} * \text{cm}^2 / \text{gr}^2 .$$

donde m_1 y m_2 son las masas de los dos cuerpos y r la distancia entre ellos.

Las fuerzas de atracción entre los cuerpos son a menudo despreciadas en el estudio del movimiento humano con la excepción de la atracción entre la tierra y los objetos. La magnitud de esta atracción, fuerza conocida como el **peso**, depende de la masa de los objetos implicados y de la distancia entre ellos.

PESO (w) : representa la fuerza con la cual la masa del cuerpo es atraída por la atracción de la tierra ($w = m * g$).

Es importante diferenciar los conceptos de masa y de peso. La masa, como ya fue definida, es la cantidad de partículas que posee un cuerpo mientras que el peso es la fuerza con la que esa masa es atraída por la gravedad de la tierra.

Las básculas generalmente miden la masa de los cuerpos y de ahí que sus unidades se dan en kilogramos. Un error común en biomecánica es confundir masa con peso, mas específicamente, al tomar las unidades de las básculas como unidades de peso.

De la ley de atracción gravitacional se desprende que el peso varía con la altura sobre el nivel del mar porque varía la distancia entre los cuerpos. Así por ejemplo, Bob Bemon, campeón olímpico de salto largo en México (altitud de 2.250 m) tenía una masa de 75 Kg, con un peso a nivel del mar de 736 N, pero a la altura de ciudad de México fue de 735 N.

La dirección del vector peso es siempre vertical hacia el centro de la tierra; el origen del vector es un punto conocido como el centro de gravedad. El centro de gravedad representa un punto de balance, un lugar en el cual todas las partículas del cuerpo están eventualmente representadas. Existen varias metodologías para calcularlo; la mas conocida está la de Dempster (1955) basada en el estudio de cadáveres. Dempster encontró el peso de cada segmento corporal y lo comparó con el peso total, determinando el peso relativo para cada uno de ellos (peso del segmento * 100 / peso total del cuerpo). Igualmente, mediante el método de la balanza halló el centro de masa de cada segmento, relacionándolo con la longitud total del mismo. Determinó un promedio de distancia relativa (distancia desde el punto proximal al punto donde se ubica el centro de gravedad * 100 / distancia total del segmento corporal) para 14 segmentos corporales, todos ubicados en dirección próximo distal. El cuadro siguiente resume sus hallazgos.

Segmento	% Centro de gravedad	Peso relativo (%)
Cabeza y cuello	60.4	7.9
Tronco	49.5	48.8
Brazo	43.6	2.7
Antebrazo	43.0	1.6
Mano	50.6	0.6
Muslo	43.3	9.7

Pierna	43.3	4.5
Pie	42.9	1.4

Chandler y col (1975), realizando procedimientos semejantes en cadáveres llegaron a similares resultados. El siguiente resultado resume sus resultados.

Segmento	Peso relativo (%)	% Centro de gravedad
Cabeza	0.032 W + 18.70	66.3
Tronco	0.532W - 6.93	52.2
Brazo	0.022W + 4.76	50.7
Antebrazo	0.013W + 2.41	41.7
Mano	0.005W + 0.75	51.5
Muslo	0.127W - 14.82	39.8
Pierna	0.044W - 1.75	41.3
Pie	0.009W + 2.48	40.0

En esta metodología, para hallar el peso relativo de cada segmento corporal se utiliza la fórmula anotada, multiplicando la constante por el peso corporal (en Newton) y sumándole o anotándole la otra constante. El centro de masa se halla multiplicando la longitud del segmento por la constante anotada. La dirección siempre es próximo-distal.

Zatsiorsky y Seluyanov (1983) realizando estudios rayos gamma llegaron a las fórmulas que resumen los siguientes cuadros.

Segmento	Masa (Kg)		
	B ₀	B ₁	B ₂
Cabeza	1.2960	0.0170	0.0143
Tronco sup.	8.2144	0.1862	-0.0584
Tronco medio	7.1810	0.2234	-0.0663
Tronco infer.	-7.4980	0.0976	0.0490
Brazo	0.2500	0.0301	-0.0027
Antebrazo	0.3185	0.0144	-0.0011
Mano	-0.1165	0.0036	0.0017
Muslo	-2.6490	0.1463	0.0137
Pierna	-1.5920	0.0362	0.0121
Pie	-0.8290	0.0077	0.0073

Para hallar la masa de cada segmento, se emplea la fórmula :

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2$$

donde B₀, B₁ y B₂ son los coeficientes anotados en la tabla, X₁ es la masa en Kg. del sujeto y X₂ es la talla en cm.

Segmento	Centro de gravedad (%)		
	B ₀	B ₁	B ₂
Cabeza	8.3570	-0.0025	0.0230
Tronco sup.	3.3200	0.0076	0.0470
Tronco medio	1.3980	0.0058	0.0450

Tronco infer.	1.1820	0.0018	0.0434
Brazo	1.6700	0.0300	0.0540
Antebrazo	0.1920	-0.0280	0.0930
Mano	4.1100	0.0260	0.0330
Muslo	-2.4200	0.0380	0.1350
Pierna	-6.0500	-0.0390	0.1420
Pie	3.7670	0.0650	0.0330

Para hallar el porcentaje del centro de gravedad , se emplea la fórmula

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2$$

donde B_0 , B_1 y B_2 son los coeficientes anotados en la tabla, X_1 es la masa en Kg. del sujeto y X_2 es la talla en cm.

Plaggenhog (1983) encontró los siguientes resultados:

	Centro gravedad		Peso relativo	
	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Cabeza	55	55	8.26	8.2
Tronco	63	56.9	55.1	53.2
Brazo	43.6	45.8	3.25	2.9
Antebrazo	43	43.4	1.87	1.257
Mano	46.8	46.8	0.65	0.5
Muslo	43.3	42.8	10.5	11.75
Pierna	43.4	41.9	4.75	5.35
Pie	50	50	1.43	1.33

FUERZAS DE CONTACTO.

Estas fuerzas no son realmente fuerzas de diferente tipo, sino diferencias en el agente que causa la interacción. Tales fuerzas se hallan frecuentemente en análisis de movimiento humano y son : la fuerza de reacción articular, la fuerza de reacción de la tierra, la fuerza elástica y la fuerza muscular.

FUERZA DE REACCIÓN ARTICULAR:

Cuando un sistema es definido de manera que los músculos representan una fuerza externa, entonces el concepto de fuerza de reacción articular es definida como *la cantidad de fuerza neta generada por el contacto entre hueso-hueso de segmentos corporales adyacentes*. En la mayoría de los casos, estas fuerzas no son calculadas, pero con la tecnología apropiada, es posible determinarla.

FUERZA DE REACCIÓN DE LA TIERRA.

FRICCIÓN (F_{fr}) : es la fuerza que acciona en dirección tangencial al punto de contacto entre dos cuerpos y opone resistencia o impide el movimiento ($F_{fr} = \mu^* F_N$). (μ = coeficiente de fricción ; F_N = fuerza normal).

IMPACTO = representa el choque entre dos cuerpos en movimiento relativo, uno con respecto a otro.

LEY DE IMPACTO DE NEWTON : si dos cuerpos se mueven uno hacia el otro en una línea recta, la diferencia de las velocidades después del impacto depende de la diferencia de sus velocidades en el momento del impacto .

$$V_1 - V_2 = -e (U_1 - U_2)$$

$$-e = V_1 - V_2 / U_1 - U_2$$

(coeficiente de restitución)

$$V_1 / U_1 = -e$$

(choque con un cuerpo fijo).

V = velocidad después del impacto

U = velocidad antes del impacto

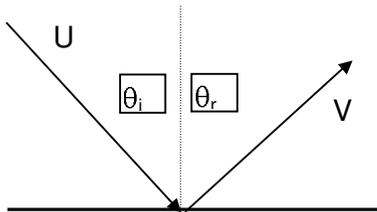
Rebote vertical de una pelota :

$$U_1 = (2gh_a)^{1/2} \text{ (antes del impacto)}$$

$$V_1 = (2gh_d)^{1/2} \text{ (después del impacto)}$$

$$e = (h_a / h_d)^{1/2}$$

Impacto oblicuo :



θ_i = ángulo de incidencia

θ_r = ángulo de reflexión

U = velocidad antes del impacto

V = velocidad después del impacto.

Impacto entre dos cuerpos en movimiento :

El momento del sistema antes del impacto es igual al momento del sistema después del impacto :

$$m_1 * U_1 + m_2 * U_2 = m_1 V_1 + m_2 * V_2$$

PRESIÓN : representa la fuerza aplicada sobre la unidad de superficie ($P = F/A$; N / cm^2).

TRABAJO MECÁNICO (W): cuando una fuerza actúa sobre un objeto y lo desplaza venciendo una resistencia, el producto de la fuerza y el desplazamiento producido durante la acción es el trabajo mecánico realizado ($W = F*d$; $N*m = 1 \text{ Joule}$).

POTENCIA : representa la rapidez de la realización de un trabajo mecánico ($P = W/t = F*V = \text{Joule / seg} = \text{vatio}$).

ENERGÍA CINÉTICA : es la energía producida en virtud del movimiento ($E_c = \frac{1}{2} mv^2 =$ Joule).

ENERGÍA POTENCIAL : es la energía adquirida en virtud de su posición o altura ($E_p = mgh$).

ENERGÍA MECÁNICA : es igual a la suma de la energía cinética mas la energía potencial. Esta energía es constante durante el movimiento.

CINÉTICA ROTATORIA

FUERZA EXCÉNTRICA : es la una fuerza cuya línea de acción no pasa o no actúa directamente sobre el centro de masa de un cuerpo o sobre el eje de giro.

TORQUE O MOMENTO DE UNA FUERZA :es el producto entre la fuerza y el brazo de momento de la misma ($\tau = F \cdot bm = N \cdot m$)

EQUILIBRIO : es el estado de descanso de un cuerpo. Se obtiene cuando sobre un cuerpo actúan fuerzas balanceadas. Las condiciones de equilibrio de un cuerpo son:
 $\Sigma\tau = 0$, $\Sigma F = 0$.

EQUILIBRIO ESTABLE : un cuerpo que puede rotar se encuentra en equilibrio estable cuando un pequeño desplazamiento angular origina un momento que lleva al objeto a su posición inicial (centro de masa debajo de la base de apoyo).

EQUILIBRIO INESTABLE : un cuerpo que puede rotar se encuentra en equilibrio inestable cuando un pequeño desplazamiento angular origina un momento que hace aumentar el desplazamiento (centro de masa encima de la base de apoyo).

EQUILIBRIO INDIFERENTE : un cuerpo que puede rotar se encuentra en equilibrio indiferente cuando en cualquier posición permanece en equilibrio (centro de masa pasa por el eje de giro).

FACTORES DE LA ESTABILIDAD :

1. Un cuerpo es mas estable en cuanto mayor área de sustentación posea.
2. Un cuerpo es mas estable en cuanto mayor peso posea.
3. Un cuerpo es mas estable en cuanto menor sea la altura del centro de masa en relación a su base de sustentación.
4. Un cuerpo es mas estable en cuanto la proyección del centro de masa del cuerpo sobre la base de sustentación caiga mas al centro de esta.
5. Un cuerpo es mas estable en cuanto mayor sea el ángulo de estabilidad tomado este como el ángulo formado entre el centro de masa y los bordes de la base de sustentación en relación a la perpendicular del piso.

MOMENTO DE INERCIA : es la resistencia de los cuerpos a la aceleración angular y depende de la masa del cuerpo y de su distribución alrededor del eje de giro.
($I = mr^2$)

MOMENTUM ANGULAR : es la cantidad de movimiento angular que posee un cuerpo en movimiento; es igual al producto entre su velocidad angular y el momento de la inercia de la masa alrededor del eje de giro. ($M = I * \omega = mr^2 * \omega$)

FUERZA CENTRÍPETA : es la fuerza de dirección radial (hacia el centro de la circunferencia) que produce la aceleración centrípeta, originada por el cambio de dirección y sentido del vector velocidad tangencial. ($F_{cp} = m * a_{cp}$; $F_{cp} = m * v^2 / r = m * r * \omega^2$).

FUERZA CENTRÍFUGA : es la fuerza que actúa en dirección radial, alejando el cuerpo del centro de rotación ($F_{cf} = - F_{cp}$).

LEYES DE NEWTON EN EL MOVIMIENTO ANGULAR :

PRIMERA LEY : un cuerpo que rota, continuará rotando alrededor de su eje con un momentum angular constante, a menos que sobre él actúe una cupla o una fuerza excéntrica.

SEGUNDA LEY : la aceleración angular de un cuerpo es proporcional con el torque (momento) que la produce y se realiza en la dirección de la acción del torque.

TERCERA LEY : Para cada torque aplicado sobre un cuerpo, existe un torque opuesto de igual magnitud pero de sentido contrario.

TRANSFORMACIÓN DEL MOMENTUM ANGULAR : el momentum angular de una parte del cuerpo se transfiere a todo el cuerpo en el momento de la desaceleración brusca de las partes del cuerpo.

variable	Cinética lineal	Cinética Rotatoria
• Masa	m	$I = mr^2$
• Cantidad de movimiento	$q = m * v$	$M = mr^2 * \omega$
• Fuerza	$F = m * a$	$L = I * \alpha$
• Impulso	$F * t$	$L * t$
• Trabajo	$F * d$	$L * \theta$
• Potencia	$F * V$	$L * \omega$
• Energía cinética	$\frac{1}{2} mv^2$	$\frac{1}{2} I * \omega^2$

BIBLIOGRAFIA

- ENOKA, R. (1988). Neuromechanical Basis of Kinesiology. Human Kinetics. Champaign, Illinois.
- HAY, J.G. (1978) The Biomechanics of Sports Techniques. 2 ed. Prentice Hall, Inc.

- LUTTGENS, K., Wells, K. (1982). Kinesiología: Bases científicas del movimiento humano. 7 ed. Saunders College Publishing.
- O'CONNEL, A., GARDNER, E. (1981). Understanding The Scientific Bases of Human Movement. Williams Wilkins. Baltimore, London.
- WILLIAMS, I.M., LESSNER, H. (1991). Biomecánica del movimiento humano. Ed. Trillas, Argentina.
- GUTIERREZ, M. 1999. Biomecánica Deportiva. Síntesis: Vallerhermoso.