

BIOMECÁNICA



I.N.E.F.

INSTITUTO NACIONAL DE EDUCACIÓN FÍSICA

**BIOMECÁNICA DE
LA ACTIVIDAD FÍSICA
Y DEL DEPORTE**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Dimas Carrasco Bellido
David Carrasco Bellido

ÍNDICE

TEMA 1

INTRODUCCIÓN A LA BIOMECÁNICA

1. Concepto de biomecánica. Biomecánica vs Mecánica. Biomecánica vs Kinesiología.
2. Orígenes, evolución y aplicaciones a la biomecánica.

TEMA 2

ANÁLISIS SEGMENTARIO DEL CUERPO HUMANO

1. Descripción de los segmentos del cuerpo humano.
2. Descripción de los movimientos anatómicos. Planos y ejes. Sistema de referencia.

TEMA 3

REPASO ELEMENTAL DE FÍSICA

1. Magnitudes físicas vectoriales.
2. Operaciones elementales de vectores.

TEMA 4

CINEMÁTICA LINEAL I

1. Magnitudes y unidades fundamentales.
2. El vector posición.
3. Conceptos de trayectorias y desplazamiento.
4. Velocidad.
5. Aceleración.
6. Momento de un punto cuando el sistema de referencia a su vez se mueve con un movimiento de traslación.

TEMA 5

CINEMÁTICA II

1. Esquema de los tipos de movimiento.
2. El movimiento rectilíneo uniforme.
3. Movimiento uniformemente acelerado.

TEMA 6

CINEMÁTICA ANGULAR

1. Movimiento circular.
2. Relación entre la cinemática lineal y la cinemática angular.

TEMA 7

LA CINEMÁTICA DEL SÓLIDO

1. Definiciones.
2. Tipos de movimiento a los que puede estar sometido un sólido rígido.

TEMA 8

DINÁMICA

1. Movimiento lineal o cantidad de movimiento.
2. Trabajo mecánico.
3. Potencia.
4. La energía mecánica.
5. Fuerzas aplicadas a un sólido rígido.
6. Momento de un vector F respecto de un punto.
7. Par de fuerzas.
8. Sistemas de fuerzas mecánicamente equivalente y sus teoremas.
9. Tipos de sistemas de fuerzas y su resolución.
10. Centro de gravedad y centro de masas.
11. Momento angular de una partícula.

TEMA 9

MOMENTO DE INERCIA

1. Concepto y propiedades.
2. Teorema de Steiner.

TEMA 10

LA MARCHA HUMANA

1. Introducción.
2. Fases d la marcha.
3. Análisis de un ciclo.
4. Cinemática de la marcha.
5. Otras consideraciones.
6. Análisis muscular de las fases de la marcha.

TEMA 11

BIOMECÁNICA DEL MIEMBRO INFERIOR. LA CADERA

1. Introducción.
2. Descripción anatómica de la cadera.
3. Los músculos que intervienen en los movimientos de la cadera.

TEMA 12

LA RODILLA

1. Introducción.
2. Los ejes de la articulación de la rodilla, sus movimientos y sus grados.
3. Los desplazamientos laterales de la rodilla.
4. Descripción anatómica de la rodilla.
5. Los movimientos de los cóndilos sobre las glenoides en la flexión – extensión.
6. Los movimientos de los cóndilos sobre las glenoides en los movimientos de rotación axial.
7. La cápsula articular y los ligamentos de la rodilla.
8. Meniscos interarticulares y sus compartimentos durante los movimientos.
9. Los músculos que participan en la rodilla.

TEMA 13

EL TOBILLO

1. Introducción.
2. Estructuras anatómicas articulares.
3. Ligamentos del movimiento.
4. Movilidad y estabilidad del tobillo.
5. Músculos motores de la flexo – extensión.

TEMA 14

LA BÓVEDA PLANTAR

1. Introducción.
2. Deformaciones dinámicas de la bóveda en la marcha.
3. Adaptación de la bóveda plantar al terreno.

TEMA 15EL RAQUIS EN SU CONJUNTO

1. El raquis, eje sostenido.
2. El raquis, eje del cuerpo y protector del eje nervioso.
3. Las curvaturas del raquis tomadas en su conjunto.
4. La aparición de las curvas raquídeas.
5. Constitución de la vértebra tipo.
6. Las curvaturas raquídeas.
7. Estructura del cuerpo vertebral.
8. Las dimensiones funcionales del raquis.
9. Los elementos de unión intervertebral.
10. El nucleus asimilado a una rótula.
11. La migración de agua en el nucleus.
12. Fuerzas de compresión sobre el disco.
13. Compartimento del disco intervertebral en los movimientos elementales.
14. Rotación automática del raquis durante la inflexión lateral.

TEMA 1

INTRODUCCIÓN A LA BIOMECÁNICA

1. Concepto de biomecánica. Biomecánica vs Mecánica. Biomecánica vs Kinesiología.

La biomecánica es la ciencia que estudia los movimientos de los sistemas biológicos desde el punto de vista de la mecánica. Dentro de la actividad física y el deporte, el concepto de biomecánica se define como la ciencia que estudia los movimientos del ser humano y las fuerzas que las generan.

La biomecánica es un término que se diferencia de la mecánica y de la kinesiología, aunque todos ellos tengan como elemento en común el movimiento.

Concretamente, la mecánica nos permite definir y cuantificar el movimiento de los cuerpos, es decir, estudia la causa y el efecto del movimiento. Mientras que la kinesiología es la ciencia del movimiento.

2. Orígenes, evolución y aplicaciones de la biomecánica.

Originariamente, la biomecánica se apoya en:

1. Cinemática: parte de la física que estudia los movimientos, independientemente de las causas del mismo. Se divide en dos tipos:

1.1. *Cinemática lineal.*

1.2. *Cinemática angular.*

Ambas presentan diferentes conceptos importantes de la física, como la aceleración, la posición y la velocidad.

2. Cinética: parte de la física que estudia las fuerzas que producen el movimiento. Se divide en:

2.1. *Cinética lineal*: analiza la fuerza.

2.2. *Cinética angular*: analiza los momentos.

TEMA 2

ANÁLISIS SEGMENTARIO DEL CUERPO HUMANO

1. Descripción de los segmentos del cuerpo humano.

El cuerpo humano está dividido en 14 segmentos, todos ellos sustituidos por un eje, el cual, se encuentra definido por dos puntos característicos que generalmente coinciden con las articulaciones. Los diferentes segmentos con sus correspondientes ejes son:

- 1º Segmento: la cabeza, a la cual, se le asocia el cuello. Su eje viene definido por dos puntos:
 - a) Vertex.
 - b) Aproximadamente la articulación atloaxoidea.
- 2º Segmento: el tronco, el cual, está comprendido por la columna vertebral, pelvis y escápulas humerales. Los cuatro puntos básicos son las 2 escápulas humerales y las 2 coxofemorales. Su eje viene definido por dos puntos:
 - a) La fosa supraesternal (encima del mango del esternón).
 - b) El punto medio de las 2 coxofemorales.
- 3º y 4º Segmento: los brazos. Su eje viene definido por dos puntos:
 - a) La escápula humeral.
 - b) La articulación humero - cubital.
- 5º y 6º Segmento: los antebrazos. Su eje viene definido por dos puntos:
 - a) La articulación humero - cubital.
 - b) La línea intercarpiana de la muñeca.
- 7º y 8º Segmento: las manos. Su eje viene definido por dos puntos:
 - a) La línea intercarpiana de la muñeca.
 - b) La articulación metacarpo - falángica del tercer dedo.
- 9º y 10º Segmento: los muslos. Su eje viene definido por dos puntos:
 - a) La coxofemoral.
 - b) La rodilla, concretamente en la línea intercondilar de la articulación femoro – tibial, es decir, 2 cm. por encima de la cabeza del peroné.

- 11° y 12° Segmento: las piernas. Su eje viene definido por dos puntos:
 - a) La rodilla, concretamente en la línea intercondilar de la articulación femoro – tibial, es decir, 2 cm. por encima de la cabeza del peroné.
 - b) El tobillo, concretamente el punto medio de la línea maleolar, que se corresponde con la articulación tibio – peroneo – astragalino.
- 13° y 14° Segmento: las piernas. Su eje viene definido por dos puntos:
 - a) *Proximal*: el tobillo, concretamente el punto medio de la línea maleolar, que se corresponde con la articulación tibio – peroneo – astragalino.
 - b) *Distal*: dos puntos:
 - El punto de contacto del calcaneo con el suelo.
 - Por delante de la articulación metatarsofalángica del tercer dedo.

2. Descripción de los movimientos anatómicos. Planos y ejes. Sistema de referencia.

Las articulaciones del cuerpo humano realizan una serie de movimientos, los cuales determinan unos grados de libertad para cada articulación. Por ejemplo, el codo tiene 1° grado de libertad, ya que realiza los movimientos sólo de flexión – extensión, la muñeca tiene 2° grado de libertad y la escápula – humeral tiene 3° grado de libertad ya que es capaz de realizar todo tipo de movimiento.

El movimiento anatómico de *flexión – extensión* lo realizan:

- Cabeza, tronco, hombro, codo, muñeca, rodilla, tobillo y cadera.

El movimiento anatómico de *abducción - adducción* lo realizan:

- Escápula – humeral, hombro, dedos y caderas.

El movimiento anatómico de *rotación* lo realizan:

- Cabeza, tronco, brazo, pierna, rodilla y tobillo.

Los diferentes planos y ejes a través de los que se realiza los movimientos anatómicos son:

1. Plano sagital o anteroposterior que se corresponde con el eje frontal o transversal.
2. Plano frontal que se corresponde con el eje sagital o anteroposterior.
3. Plano transversal o horizontal que se corresponde con el eje vertical.

Existen una serie de movimientos con nombre propio, los cuales con:

- La cabeza y el tronco realizan flexiones laterales en el plano frontal, a lo que se le llama movimientos de inclinación.
- En escápulas, elevación y descenso de la misma.
- El vértice inferior de la escápula se mueve hacia fuera y hacia dentro en forma de rotación.
- En el antebrazo, el radio se desliza sobre el cubito, a lo que se le llama movimiento de pronó – supinación.
- El brazo sufre la abducción horizontal.
- El tobillo realiza la flexión plantar y la flexión dorsal.
- La inversión del pie incluye la flexión – abducción y la supinación.
- La reversión del pie incluye la extensión – abducción y la pronación.

El sistema de referencia de los movimientos humanos es el formado por los tres ejes:

TEMA 3

FÍSICA ELEMENTAL

1. Magnitudes físicas vectoriales.

Un vector es un segmento orientado que tiene su origen en el punto A y su extremo en el punto B.

Un vector x queda definido por su:

1. Módulo: es la longitud del segmento [AB].
2. Dirección: es la recta que pasa por A y B.
3. Sentido: es el recorrido de la recta cuando nos trasladamos de A a B. En cada dirección hay dos sentidos, el que va desde A hasta B y el que va desde B hasta A.
4. Origen: punto de partida del vector, en este caso es A.
5. Extremo: punto final del vector, en este caso es B.

El **vector unitario** u es aquel vector elegido convencionalmente como unidad de medida y cuyo módulo vale la unidad. Mientras que el *vector nulo* es el que tiene de módulo cero. Otro vector característico es el *vector negativo* de un vector que es aquel que tiene el mismo módulo y dirección pero de sentido contrario.

Para representar un punto o un vector en el espacio utilizamos un sistema de tres ejes perpendiculares entre sí a los que llamaremos: eje X, eje Y y eje Z. Las coordenadas o componentes cartesianas de un punto, son las proyecciones del vector que une el origen de coordenadas con dicho punto sobre cada uno de los ejes X, Y, Z.

Si tenemos en cuenta que en cada uno de los tres ejes podemos situar un vector unitario con la misma dirección del eje y sentido positivo o negativo según el caso, obtenemos tres vectores unitarios perpendiculares entre sí de tal manera que:

- El vector **i** está situado sobre el eje X.
- El vector **j** está situado sobre el eje Y.
- El vector **k** está situado sobre el eje Z.

2. Operaciones elementales de vectores.

2.1. Suma y resta de vectores.

Para sumar dos vectores libres a y b , se toma como punto arbitrario O del plano y se trazan perpendiculares a los vectores, para terminar uniendo el punto O con la intersección de ambas perpendiculares. El vector suma es el representado por $a + b$.

Para restar dos vectores libres a y b , pues se realiza lo mismo que en la suma pero sabiendo que el segundo vector tiene sentido contrario, e igual módulo y dirección.

Algebraicamente $a + b$ se determina de la siguiente manera:

$$a = x_1 i + y_1 j + z_1 k$$

$$a + b = (x_1 + x_2) i + (y_1 + y_2) j + (z_1 + z_2) k$$

$$b = x_2 i + y_2 j + z_2 k$$

2.2. Producto de un escalar por un vector.

Dado un vector no nulo a y un número real no nulo k , se llama producto de un número real por un vector al vector que tiene por:

- a) *Módulo*: ka .
- b) *Dirección*: la del vector a .
- c) *Sentido*: 2 opciones:
 - El mismo que a si k es positivo.
 - El opuesto que a si k es negativo.

2.3. Producto escalar de dos vectores.

El producto escalar de dos vectores es un escalar que resulta de multiplicar los módulos de los vectores por el coseno del ángulo que forman.

$$\boxed{a \cdot b = |a| \cdot |b| \cdot \cos \alpha}$$

Si $\alpha = 0^\circ$, $\cos \alpha = 1$ ($a \cdot b = \max$)

Si $\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$ ($a \cdot b = 0$)

El producto escalar tiene la propiedad conmutativa, es decir, da lo mismo $a \cdot b$ que $b \cdot a$, ya que α y $-\alpha$ tienen iguales cosenos.

Si tenemos dos vectores dados por su expresión algebraica, el producto escalar de $a \cdot b$ daría:

$$a = ax \mathbf{i} + ay \mathbf{j} + az \mathbf{k}$$

$$b = bx \mathbf{i} + by \mathbf{j} + bz \mathbf{k}$$

$$a \cdot b = (ax \cdot bx) \mathbf{i} + (ay \cdot by) \mathbf{j} + (az \cdot bz) \mathbf{k}$$

2.4. Producto vectorial de dos vectores.

El producto vectorial de dos vectores es otro vector que se define por:

- a) *Módulo*: $a \times b = |a| \cdot |b| \cdot \sin \alpha$
- b) *Dirección*: es perpendicular al plano que contiene a los vectores a y b por el punto O .
- c) *Sentido*: para averiguar el sentido utilizamos la regla del tornillo:
 1. Si el tornillo gira en el sentido de las agujas del reloj, el tornillo se estaría atornillando y por tanto, el sentido del vector sería hacia abajo o negativo.
 2. Si el tornillo gira en el sentido contrario de las agujas del reloj, el tornillo se estaría destornillando y por tanto, el sentido del vector sería hacia arriba o positivo.

Para calcular el vector resultante del producto vectorial, hemos de resolver una matriz en la que:

- En la 1ª línea se sitúan siempre los vectores unitarios i, j, k .
- En la 2ª línea se sitúan las coordenadas del primer vector nombrado en el producto vectorial.
- En la 3ª línea situamos las coordenadas del segundo vector nombrado en el producto vectorial.

$$a \times b = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

$$a \times b = (a_y \cdot b_z - a_z \cdot b_y) i + (a_z \cdot b_x - a_x \cdot b_z) j + (a_x \cdot b_y - a_y \cdot b_x) k$$

El producto vectorial de dos vectores no posee la propiedad conmutativa.

2.5. Momento de un vector respecto a un punto.

El momento de un vector a respecto a un punto O es el producto vectorial del vector distancia r_a (desde O hasta el origen del vector a) por el vector a .

$$\boxed{M_o = r_a \times a}$$

Este vector se define por:

- Módulo:* $r_a \cdot a \cdot \sin \alpha$
- Dirección:* es perpendicular al plano por el punto O .
- Sentido:* hacia arriba.

2.6. El modulo de un vector.

El módulo de un vector es la raíz cuadrada positiva de la suma de los cuadrados de sus componentes.

$$|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

TEMA 4**CINEMATICA LINEAL I****1. Magnitudes y unidades fundamentales.**

La cinemática para realizar el estudio de los movimientos ha establecido una serie de puntos de referencia como son las magnitudes fundamentales. En el sistema internacional tenemos la siguiente relación:

Magnitud	Unidad
Longitud	Metro (m)
Masa	Kilogramo (Kg)
Tiempo	Segundo (s)
temperatura	Kelvin (K)

2. El vector posición.

Para poder hacer el estudio de los movimientos, que no es más que un cambio de posición de un cuerpo, hemos de definir previamente una serie de magnitudes físicas que se utilizan como sistemas de referencia. Estas magnitudes físicas son el espacio y el tiempo.

Ambas magnitudes nos llevan a determinar que el vector posición r tiene una referencia temporal t , lo que significa que en un instante determinado ($t=1$) el vector posición está en un punto concreto del espacio y en otro instante determinado ($t=2$) el vector posición ha variado su posición en el espacio. Esto supone la siguiente ecuación:

$$\boxed{r(t) = x(t) \mathbf{i} + y(t) \mathbf{j} + z(t) \mathbf{k}}$$

3. Conceptos de trayectoria y desplazamiento.

El desplazamiento es una magnitud vectorial que nos informa de la variación de la posición de un cuerpo en un movimiento. Se expresa como:

$$\boxed{S = r_2 - r_1 = \Delta r}$$

La trayectoria se puede definir como las sucesivas posiciones reales por las que pasa un cuerpo al desplazarse.

El gráfico anterior nos indica que la trayectoria y el desplazamiento no van a coincidir, aunque existe un caso en el que sí, el cual es cuando los intervalos de tiempo son muy pequeños, como muestra el siguiente gráfico.

4. Velocidad.

La velocidad es la variación del espacio recorrido en relación al tiempo empleado en recorrerlo. Es una magnitud vectorial, ya que es un cociente entre el vector desplazamiento y el tiempo.

Se puede decir que existe dos tipos de velocidades:

1. La velocidad media: es la velocidad escalar. Se define como, el cociente entre el desplazamiento y el tiempo empleado en el mismo. Se expresa como:

$$V_{\text{med}} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

2. La velocidad instantánea: es la velocidad vectorial. Se define como la velocidad de un móvil en un instante. La velocidad instantánea es un vector que tiene por módulo la derivada del espacio respecto al tiempo (ds / dt); por dirección, la de la tangente a la trayectoria en el punto considerado; y por sentido, el del movimiento. Se expresa como:

$$V_i = V_x i + V_y j + V_z k$$

5. Aceleración.

La aceleración es la variación de la velocidad en relación al tiempo. Debido a que existen dos tipos de velocidades, la aceleración se va a dividir en dos también, las cuales son:

1. La aceleración media: se define como el cociente entre la variación de la velocidad y el tiempo transcurrido. Se expresa como:

$$a_{\text{med}} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}}{t_1 - t_0}$$

2. La aceleración instantánea: se define como la aceleración de un móvil en un instante. La instantánea es un vector que tiene por módulo la derivada de la velocidad respecto al tiempo; y como dirección y sentido lo siguiente:

- a) *Si es un movimiento rectilíneo*: la dirección y el sentido es la misma que la del vector velocidad.
- b) *Si es un movimiento curvilíneo uniforme*: aquí la velocidad es constante en su módulo pero no en su dirección y sentido que varía constantemente para adecuarse a la curva, por lo tanto la dirección y sentido es el del vector Δv .

$$a = a_x i + a_y j + a_z k$$

5. 1. Componentes intrínsecas de la aceleración.

Cuando el movimiento de un móvil es curvilíneo variado (aceleración no constante y velocidad no constante), la aceleración no tiene la dirección radial del movimiento curvilíneo uniforme, sino que su módulo y dirección varía constantemente. Para el estudio de la aceleración de este movimiento lo que hacemos es descomponer el vector aceleración en dos componentes perpendiculares entre si, de tal manera que una componente sea tangente a la trayectoria, llamada *aceleración tangencial* y otra componente que tenga una dirección radial, llamada *aceleración normal*.

La aceleración instantánea de un móvil sea cual fuere su movimiento, hemos de calcularla a través de la siguiente ecuación (1):

Para hallar su módulo se aplica esta fórmula (2):

¹ $a = at + an$	² $ a = (at)^2 + (an)^2$
-------------------------------	---

La *aceleración tangencial* nos informa sobre la variación del módulo de la velocidad en relación al tiempo y se expresa:

$$at = \frac{d |v|}{dt}$$

La *aceleración normal* nos informa sobre la variación de la dirección de la velocidad y se expresa como:

$$An = \frac{|v|^2}{R}$$

6. Momento de un punto cuando el sistema de referencia a su vez se mueve con un movimiento de traslación.

Los momentos se expresan a través del vector posición. Pues al moverse el sistema de referencia, el nuevo momento se expresa con un vector de posición resultante de la suma de ambas posiciones. Por tanto:

$r(t) = r_0(t) + r'(t)$	$v = v_0 + v'$	$a = a_0 + a'$
-------------------------	----------------	----------------

TEMA 5

CINEMÁTICA II**1. Esquema de los tipos de movimiento.**

1. Movimiento rectilíneo uniforme:

$$r = r_0 + v \cdot t$$

2. Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado:

$$v = v_0 + a \cdot t$$

$$r - r_0 = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad \text{o} \quad r = r_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

1.1. Movimiento de caída libre.

$$v = v_0 - g \cdot t$$

$$h = h_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

$$V_c = 2gh$$

2.2. Lanzamiento horizontal.

$$x = x_0 + v_x \cdot t$$

$$V_x = V_0$$

$$h = \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

$$V_y = -g \cdot t$$

2.3. Lanzamiento parabólico.

$$\left. \begin{array}{l} V_x = V_{0x} \\ V_{0x} = V_0 \cdot \cos \alpha \end{array} \right\} \longrightarrow V_x = V_0 \cdot \cos \alpha$$

$$\left. \begin{array}{l} x = x_0 + v_{0x} \cdot t \\ v_{0x} = V_0 \cdot \cos \alpha \end{array} \right\} \longrightarrow x = x_0 + V_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$$

$$\left. \begin{array}{l} V_y = V_{y0} - g \cdot t \\ V_{0y} = V_0 \cdot \sin \alpha \end{array} \right\} \longrightarrow V_y = V_0 \cdot \sin \alpha - g \cdot t$$

$$\left. \begin{array}{l} y = y_0 + v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \\ v_{0y} = V_0 \cdot \sin \alpha \end{array} \right\} \longrightarrow y = y_0 + V_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

2. El movimiento rectilíneo uniforme.

El movimiento rectilíneo uniforme presenta como características las siguientes:

- Su trayectoria es una línea recta.
- Su velocidad se mantiene constante como consecuencia de que el valor de la aceleración es 0.

Se dice que un móvil presta un movimiento rectilíneo uniforme cuando su velocidad es constante en módulo, dirección y sentido. Gráficamente se representaría de la siguiente manera:

La ecuación del movimiento rectilíneo uniforme es la representada por:

$$r = r_0 + v \cdot t$$

⇒ en donde r , es el espacio final; r_0 , es la posición inicial; v , es la velocidad constante y t , es el tiempo transcurrido entre t_2 y t_1 .

3. Movimiento uniformemente acelerado.

El movimiento uniforme acelerado presenta como características las siguientes:

- Su trayectoria es una línea recta.
- La velocidad no es constante al ser un movimiento acelerado.
- La aceleración es constante.
- Toda la aceleración es tangencial y no normal ya que, el R de curvatura de una recta es infinito.
- La aceleración tangencial además es constante.

Gráficamente se representaría de la siguiente manera:

Las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado son 2. La ecuación de la velocidad se representa como:

$$v = v_0 + a \cdot t$$

⇒ en donde v , es la velocidad final; v_0 , es la velocidad inicial; a , es la aceleración y t , es el tiempo transcurrido.

Mientras que la ecuación del espacio se representa como:

$$r - r_0 = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad \text{o} \quad r = r_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

⇒ en donde r , es el espacio final; r_0 , es el espacio inicial; v_0 , es la velocidad inicial; a , es la aceleración y t , es el tiempo transcurrido.

Existen tres movimientos que se estudian como casos concretos dentro del movimiento uniformemente acelerado. Estos tres movimientos tienen en común que la única aceleración que existe dentro del movimiento es la de la gravedad, la cual tiene un valor de $9,8 \text{ m/s}^2$ aunque por convenio se utiliza el valor de 10 m/s^2 . Ellos sólo se diferencian en el valor y dirección de la velocidad inicial.

3.1. Movimiento de caída libre.

El movimiento de caída libre presenta las siguientes características:

- Su trayectoria es siempre rectilínea vertical.
- La velocidad inicial es también siempre vertical.
- La aceleración es la de la gravedad hacia abajo.

Las ecuaciones del movimiento de caída libre son:

$$v = v_0 - g \cdot t$$

$$h = h_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

$$V_c = 2 gh$$

⇒ en donde v , es la velocidad final; v_0 , es la velocidad inicial; g es la gravedad y t , es el tiempo transcurrido.

⇒ en donde h , es la altura; h_0 , es la altura inicial; v_0 , es la velocidad inicial; g , es la gravedad y t , es el tiempo transcurrido.

⇒ en donde V_c , es la velocidad de caída; g , es la gravedad y h , es la altura.

De estas ecuaciones derivan unas fórmulas. Éstas fórmulas se pueden utilizar siempre que se den estas dos condiciones:

1. Velocidad inicial 0.
2. La altura inicial ha de ser 0.

$$h = \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

$$V_f = g \cdot t$$

$$h = \frac{V_f^2}{2g}$$

3.2. Lanzamiento horizontal.

El lanzamiento horizontal presenta las siguientes características:

- Es un movimiento curvilíneo descendente.
- Tiene velocidad inicial horizontal, la cual es constante.
- La aceleración que es la gravedad, hará que varíe solamente la componente vertical de la velocidad y no la horizontal.

El lanzamiento horizontal presenta dos tipos de movimiento. Estos tipos de movimiento viene determinado por cada uno de sus ejes:

1. *Sobre el eje X:* se da el movimiento rectilíneo uniforme, en donde:

- La velocidad inicial es distinta de 0 pero constante.
- La gravedad no tiene componente horizontal.

2. *Sobre el eje Y:* se da el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, de caída libre, en donde:

- La velocidad inicial es 0 al no haber componente vertical.
- La gravedad es constante hacia abajo.

Por tanto, al describir dos movimiento conocidos, sus ecuaciones serán:

a) Sobre el eje X: determina la velocidad.

$$x = x_0 + v_x \cdot t$$

$$V_x = V_0$$

b) Sobre el eje Y: determina el tiempo y la altura.

$$h = \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

$$V_y = - g \cdot t$$

Gráficamente se representaría de la siguiente manera:

2.3. Lanzamiento parabólico o movimiento del proyectil.

El lanzamiento parabólico presenta las siguientes características:

- Es un movimiento parabólico.
- Tiene velocidad inicial horizontal, la cual es constante.

- También presenta velocidad inicial vertical.
- La aceleración que es la gravedad, hará que varíe solamente la componente vertical de la velocidad y no la horizontal.

El lanzamiento parabólico presenta dos tipos de movimiento. Estos tipos de movimiento viene determinado por cada uno de sus ejes:

1. *Sobre el eje X:* se da el movimiento rectilíneo uniforme, en donde:
 - La velocidad inicial es distinta de 0 pero constante.
 - La componente horizontal no se ve afectada por la gravedad, por lo tanto no tiene aceleración.
2. *Sobre el eje Y:* se da el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, en donde:
 - La velocidad inicial es distinta de cero y no es constante.
 - La gravedad es constante hacia abajo, por lo tanto tiene aceleración.

Por tanto, al describir dos movimiento conocidos, sus ecuaciones serán:

a) *Sobre el eje X:*

$$\left. \begin{array}{l} V_x = V_{ox} \\ V_{ox} = V_0 \cdot \cos \alpha \end{array} \right\} \longrightarrow \boxed{V_x = V_0 \cdot \cos \alpha}$$

$$\left. \begin{array}{l} x = x_0 + v_{ox} \cdot t \\ V_{ox} = V_0 \cdot \cos \alpha \end{array} \right\} \longrightarrow \boxed{x = x_0 + V_0 \cdot \cos \alpha \cdot t}$$

b) *Sobre el eje Y:*

$$\left. \begin{array}{l} V_y = V_{y0} - g \cdot t \\ V_{oy} = V_0 \cdot \sin \alpha \end{array} \right\} \longrightarrow \boxed{V_y = V_0 \cdot \sin \alpha - g \cdot t}$$

$$\left. \begin{array}{l} y = y_0 + v_{oy} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \\ V_{oy} = V_0 \cdot \sin \alpha \end{array} \right\} \longrightarrow \boxed{y = y_0 + V_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2}$$

Gráficamente se representaría de la siguiente manera:

TEMA 6**CINEMÁTICA ANGULAR****1. Movimiento circular.**

Los movimientos circulares se caracterizan porque la trayectoria que describe el móvil es una circunferencia. Debido a ello, la cinemática angular estudia además de la velocidad y la aceleración, el ángulo descrito por el móvil en el movimiento circular alrededor de un eje.

Estos conceptos estudiados uno a uno, dan el siguiente resultado:

a) Velocidad.

Dentro de los movimientos circulares, debemos saber, que los arcos recorridos dentro de un movimiento y para dos puntos diferentes no van a ser iguales, mientras que el ángulo descrito para cualquiera de los puntos es el mismo.

Por este motivo, existen dos tipos de velocidades:

1. *La velocidad lineal:* es el arco que recorre en la unidad de tiempo.

$$V = \frac{\Delta S}{t}$$

2. *La velocidad angular:* es el espacio angular recorrido en relación al tiempo que tarda en recorrerlo. Se representa por la letra omega (ω), se da en rad / s y se expresa así:

$$\omega = \frac{d \theta}{d t}$$

b) Aceleración.

La aceleración en los movimientos circulares se denomina aceleración angular, la cual se define como, la variación de la velocidad angular respecto al tiempo. Su fórmula es:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

c) Ángulos y arcos.

Existen dos términos que se relacionan con los ángulos y los arcos, los cuales son:

- *Frecuencia*: expresa el n° de vueltas en función del tiempo total que tarda en realizarlas.

$$\text{Fr: } \frac{\text{N}^\circ \text{ vueltas}}{t}$$

- *Periodo*: expresa el tiempo que tarda en dar una vuelta.

$$T = \frac{t}{1 \text{ vuelta}}$$

Debemos saber que trabajando con la cinemática angular la unidad fundamental es el radian que se define como el ángulo central cuya longitud de arco es igual al radio de la circunferencia en la cual está inscrito.

1.1.Movimiento circular uniforme.

Sabiendo que en éste movimiento, la velocidad angular es constante y que la aceleración es igual a 0 ($\omega = \text{cte.}$ y $\alpha = 0$), las fórmulas son:

- *Para el espacio angular*:

$$\boxed{\vartheta_2 = \vartheta_1 + \omega \cdot t}$$

\Rightarrow en donde ϑ_2 , es el espacio angular final; ϑ_1 , es el espacio angular inicial; ω , es la velocidad angular; y t , es el tiempo transcurrido.

1.2. Movimiento circular uniformemente acelerado.

Sabiendo que en éste movimiento, la aceleración angular es constante ($\alpha = \text{cte}$), las fórmulas son:

- Para la velocidad angular:

$$\omega_2 = \omega_1 + \alpha \cdot t$$

\Rightarrow en donde ω_2 , es la velocidad angular final; ω_1 , es la velocidad angular inicial; α , es la aceleración angular; y t , es el tiempo transcurrido.

- Para el espacio angular:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 + \omega_1 \cdot t + \frac{1}{2} \alpha \cdot t^2$$

\Rightarrow en donde ϑ_2 , es el espacio angular final; ϑ_1 , es el espacio angular inicial; ω_1 , es la velocidad angular inicial; α , es la aceleración angular; y t , es el tiempo transcurrido.

2. Relación entre la cinemática lineal y la cinemática angular.

Si sobre una circunferencia tomamos un intervalo suficientemente pequeño (distancia entre dos puntos muy próximos), el arco tiende a confundirse con la tangente a la trayectoria en ese punto.

$$AB = s = R \cdot \vartheta$$

Como el espacio recorrido es muy pequeño, podemos considerar diferenciales del espacio y del ángulo en las variables s y ϑ en función de una variación muy pequeña de tiempo. Esto nos lleva a determinar lo siguiente:

$$V = R \times \omega$$

\Rightarrow en donde V , es la velocidad lineal; R , es el radio; y ω , es la velocidad angular.

Si ésta fórmula, la seguimos derivando, para las aceleraciones obtenemos la siguiente relación:

$$a = R \cdot \alpha$$

$$a_t = R \cdot \frac{d|\omega|}{dt}$$

$$a_n = R \cdot |\omega|^2$$

TEMA 7

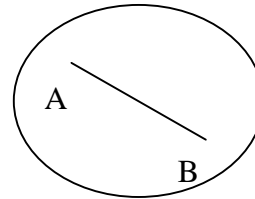
LA CINEMÁTICA DEL SÓLIDO

1. Definiciones.

Existen una serie de conceptos muy importantes dentro de la cinemática del sólido, cuyas definiciones son:

- Punto material o partícula: es un punto en el espacio.
- Sólido: es una agrupación de partículas.
- Sólido rígido: es un sistema de partículas indeformables en el que tomados dos puntos cualesquiera A y B, su distancia permanece constante en el tiempo.

$$\frac{d AB}{d t} = 0$$



2. Tipos de movimiento a los que puede estar sometido un sólido rígido.

Los movimiento a los que puede estar sometido son tres:

2.1. Traslación.

Un movimiento es de traslación si cualquier línea recta definida en un sólido conserva su dirección durante dicho movimiento. Por lo tanto los puntos que forman el sólido se mueven según trayectorias paralelas.

Sí las trayectorias son líneas rectas, el movimiento de traslación es rectilínea.

Sí las trayectorias son curvas, el movimiento de traslación será curvilíneo.

Según el dibujo anterior, las distancias AA' y BB' son iguales. Por lo tanto los vectores definidos AB y A'B' son también iguales y paralelos. Tanto en el movimiento rectilíneo como en el curvilíneo se da:

- Las velocidades de A y de B son iguales.
- Las aceleraciones de A y B son iguales.
- La distancia recorrida por A y por B son también iguales.

Todo movimiento de traslación de un sólido rígido lo podemos definir a través de un vector situado en el centro de masas de dicho sólido.

2.2. Rotación.

Un movimiento es de rotación alrededor de un eje fijo, si todos los puntos que forman el sólido se mueven en planos paralelos sobre circunferencias con centros en dicho eje.

En éste movimiento tenemos lo siguiente:

- La velocidad angular es igual en todos los puntos del sólido.
- La velocidad lineal no es igual en todos los puntos del sólido, ya que, depende de la distancia de cada punto al eje de giro (radio R).
- Al ser la velocidad angular igual en todos los puntos del sólido, tendrá mayor velocidad lineal los puntos que tengan mayor radio.

$$\begin{array}{ccc}
 \boxed{V_a = R_a \cdot \omega} & \longleftrightarrow & \boxed{V_b = R_b \cdot \omega} \longrightarrow \boxed{\omega = \frac{V}{R}}
 \end{array}$$

2.3. Movimiento mixto.

Es aquel movimiento en el cual hay una combinación de traslación y de rotación. Un ejemplo es el salto de longitud.

$$\boxed{V_a \text{ mixto} = V_a \text{ traslación} + V_a \text{ rotación}}$$

TEMA 8

DINÁMICA

La *dinámica* es la parte de la Física que estudia el movimiento en función de las causas que lo producen, es decir, las fuerzas. La dinámica se fundamenta en tres principios enunciados por Newton, los cuales son:

1. El principio fundamental de la dinámica o 2º Ley de Newton.

Este principio dice: “ si la suma de las fuerzas que actúan sobre una partícula no es nula, la partícula adquiere una aceleración de módulo proporcional, y de misma dirección y sentido que el vector suma de fuerzas ”. La constante de proporcionalidad es la masa.

Este principio queda representado por la siguiente ecuación, de la cual, se sacan las siguientes conclusiones:

$$\sum F = m \cdot \bar{a}$$

- Las fuerzas producen aceleraciones, es decir, cambios de velocidad en los cuerpos.
- La dirección y sentido de la fuerza actuante coinciden con los de la aceleración que dicha fuerza produce.
- La masa es la resistencia de un cuerpo a cambiar su estado de reposo o de movimiento.

2. El principio de inercia o 1º Ley de Newton.

Este principio dice: “ toda partícula tiende a mantener su estado de reposo o de velocidad constante, siempre que no se apliquen fuerzas sobre ella o la suma de estas fuerzas sea igual a cero ”.

$$\sum F = 0 \Rightarrow \sum F = m \cdot a \Rightarrow 0 = m \cdot a \Rightarrow a = 0 \text{ m/s}^2$$

3. El principio de acción y reacción o 3º Ley de Newton.

Este principio dice: “ si una partícula A ejerce una fuerza sobre otra partícula B, esta partícula B ejerce una fuerza igual y de sentido contrario a la de la partícula A ”.

$$F_{AB} = -F_{BA}$$

1. Momento lineal o cantidad de movimiento.

Se define *movimiento lineal* como el producto de la masa de un cuerpo por su velocidad.

$$\vec{P} = m \cdot \vec{v}$$

El momento lineal es un vector cuya dirección y sentido coinciden con el de la velocidad y cuyo módulo es el de la velocidad por la masa. Debemos saber que el principio de conservación del momento lineal nos dice que, el momento lineal permanecerá constante si la sumatoria de fuerzas es igual a cero.

$$\sum F = 0 \Rightarrow \sum F = \frac{d\vec{p}}{dt} \Rightarrow 0 = \frac{d\vec{p}}{dt} \Rightarrow m \cdot \vec{v} = \text{cte}$$

También puede darse que el momento lineal de un cuerpo varíe, identificándose con el *impulso mecánico*, que se define como el producto de la fuerza que actúa sobre un cuerpo por el intervalo de tiempo durante el cual, está actuando.

$$\vec{I}_e = \vec{F} \cdot \Delta t$$

El impulso es un vector de misma dirección y sentido que la fuerza y cuyo módulo es el de la fuerza por el tiempo. Tras una serie de operaciones se deduce que el impulso total de las fuerzas aplicadas a una partícula es igual a la variación del momento lineal de esa partícula.

$$\vec{I}_m = m \cdot \vec{v}_f - m \cdot \vec{v}_i$$

2. Trabajo mecánico.

El *trabajo mecánico* se considera como un proceso de intercambio de energía mediante el cual se produce el cambio de posición de un cuerpo. Concretamente se define como “ el producto escalar del vector fuerza por el vector desplazamiento ”.

$$W_{AB} = \vec{F} \cdot \vec{\Delta r} = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha$$

El trabajo mecánicos se puede dar en:

- Julios (newton . metros).
- Ergios (dina . cm).

De aquí obtenemos las siguientes conclusiones:

- a) $F \cdot \cos \alpha =$ es la proyección de la F sobre el vector desplazamiento.
- b) El trabajo será máximo cuando el $\cos \alpha$ valga 1.
- c) El trabajo que se realiza para levantar un objeto será siempre el mismo sea cual sea su pendiente.
- d) El trabajo que se realiza para desplazar un objeto es menor que para levantarlo, ya que, no pierde energía con el ángulo.

3. Potencia.

La **potencia** es el trabajo realizado en la unidad de tiempo. La unidad de potencia es el julio dividido por segundo (J / s) a esto se la llama Watio.

** En el deporte se utiliza mucho esta fórmula:*

$$P = \frac{W_{AB}}{\Delta t}$$

$$P = F \cdot v$$

4. La energía mecánica.

La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para generar un trabajo. La unidad de la energía es el julio. La energía mecánica se divide a su vez en energía cinética y en energía potencial.

4.1. La energía cinética.

La energía cinética es la clase de energía que tienen los cuerpos en movimiento. Su ecuación queda representada así:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Con esta expresión, el trabajo se refleja en el Teorema de la fuerzas vivas, que dice: “ la variación de energía cinética entre dos puntos es igual al trabajo entre esos dos puntos ”.

$$W_{AB} = E_{CB} - E_{CA}$$

4.2. La energía potencial.

La energía potencial es la clase de energía que poseen los cuerpos por la posición que ocupan o por la forma que tienen. Su ecuación queda representada así:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Con esta expresión, el trabajo de las fuerzas conservativas aplicado entre dos puntos es independiente de la trayectoria seguida por la partícula entre A y B. Se puede expresar dicho trabajo como la diferencia entre los valores que toma una cantidad entre dos puntos, el inicial y el final.

$$W_{AB} = E_p (A) - E_p (B)$$

4.3. Principio de conservación de la energía mecánica.

Este principio dice: “ cuando todas las fuerzas aplicadas sobre una partícula son conservativas, la energía mecánica se mantiene constante ”. Con ello, trata de explicar la suma de $E_c + E_p$ en las posiciones iniciales y finales, que son iguales. Si no son conservativas, la energía se disipa en forma de calor.

5. **Fuerzas aplicadas a un sólido rígido.**

La fuerza es un vector deslizante que aplicada a un sólido rígido puede producir dos tipos de movimiento:

- a) *Movimiento en traslación.*

b) *Movimiento de traslación más un giro.*

Para determinar el tipo de movimiento que sufre un sólido rígido, será necesario estudiar y analizar el efecto que produce la fuerza o sistema de fuerzas aplicadas sobre el sólido. Por tanto, hay dos posibilidades:

1. Una única fuerza aplicada.

Dentro de ella, existen dos posibilidades:

1.1. *La línea de acción de la fuerza pasa por el punto elegido.*

Como la fuerza es un vector deslizante, pues se aplica el principio de transmisibilidad que dice: “ el efecto de una fuerza aplicada en un sólido rígido es independiente del punto de aplicación de la fuerza a lo largo de su línea de acción ”. Esta fuerza sólo produce traslación en el punto 0.

1.2. *La línea de acción de la fuerza no pasa por el punto elegido.*

En este caso, la fuerza F es equivalente a esa misma fuerza aplicada en el punto 0, más un giro del sólido.

Esta fuerza produce una traslación más un giro respecto a 0. Para representar esa intención de giro que tendrá el sólido, es necesario definir el concepto de momento de una fuerza con respecto a un punto.

Matemáticamente se define como: “ el producto vectorial entre la fuerza y el vector distancia entre el punto de aplicación o hasta cualquier punto de la recta XX' , en la está contenida la fuerza.

$$\vec{M} = \vec{r} \wedge \vec{F} \Rightarrow / M / = / r / \cdot / F / \cdot \text{sen } \alpha$$

Físicamente se define como: “ la fuerza con la que gira un sólido respecto a un punto, debido a una fuerza que no está aplicada en dicho punto ”.

2. Un sistema de fuerzas aplicadas.

Un sistema de fuerza es un conjunto de 2 o más fuerzas. Para su estudio, se aplicará la ley de superposición de fuerzas, que dice: “ cuando sobre un sólido rígido se aplican dos o más fuerzas, éste siente el efecto de una única fuerza a la que llamaremos sumatoria de fuerzas ”.

Una vez que se haya la fuerza resultante (mediante el polígono de fuerzas), pues se analiza igual que en el caso de que sólo se aplique una fuerza:

2.1. *La línea de acción de la fuerza pasa por el punto elegido.*

Deslizamos la fuerza sin más hasta dicho punto.

2.2. *La línea de acción de la fuerza no pasa por dicho punto.*

Colocamos en el punto la fuerza y ponemos en el punto el vector momento que está fuerza producirá sobre él. Al igual que se obtiene una fuerza resultante de la sumatoria de todas las fuerzas. Se obtiene un momento total que resulta de la sumatoria de todos los momentos. Por tanto, el sistema de fuerzas aplicado a un sólido se reduce en ese punto a una resultante ($\vec{R} = \sum \vec{F}_n$) y a un momento total ($\vec{M}_T = \sum \vec{M}_O$)

Hemos visto como se analiza el efecto que produce una fuerza resultante de un sistema de fuerza. Ahora vamos a ver como se obtiene esa fuerza resultante que es equivalente al sistema de fuerza, ya que, produce el mismo efecto. Existen varias posibilidades de sistema de fuerza:

a) *Sistema forma por fuerzas coplanarias y concurrentes.*

Las fuerzas están contenidas en un mismo plano y sus respectivas direcciones se cortan en un punto, por lo menos dos a dos. Como las fuerzas son deslizantes, podemos sumarlas dos a dos y su resultante sumarla con el siguiente vector y así hallar la resultante final.

1	2
3	4

b) *Sistema formado por fuerzas coplanarias y paralelas.*

Las fuerzas están contenidas en el mismo plano, pero ahora sus líneas de acción son paralelas, es decir, no se cruzan. La fuerza resultante es una fuerza con la misma dirección que las fuerzas y cuyo módulo es la suma de los módulos de dichas fuerzas paralelas (el sentido viene dado por la diferencia de vectores en un sentido y otro).

<p>1. Tenemos dos fuerzas paralelas aplicadas a un sólido, unidos los puntos A y B de aplicación de ambas fuerzas mediante una recta.</p>	<p>2. Sobre la recta XX' se aplican dos fuerzas iguales pero de sentido contrario, \vec{F} y $-\vec{F}$, lo que no modifica el efecto que produce pero nos permite hallar 2 resultantes, R1 y R2, que se cortan en el mismo plano.</p>
<p>3. R1 y R2 se deslizan hasta el punto de corte C. Se deshace en C la suma de R1 y R2, dando F1 y F2 en el mismo sentido, siendo el vector resultante la suma de ambos módulos. $\vec{R}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$</p>	

Una vez hallado el vector resultante, se debe buscar el punto de aplicación contenido en la recta X y X' para poder definirlo. Para ello realizaremos:

<p style="text-align: center;"><u>FUERZAS PARALELAS DE MISMO SENTIDO</u></p> <p>Se aplica en F1: F2, mientras que en F2: - F1. Ambos puntos hallados se unen dando el punto de corte C, punto de aplicación de \vec{R}.</p>	
---	--

FUERZAS PARALELAS DE SENTIDO CONTRARIO

Se aplica en F1: F2 en sentido contrario, mientras que en F2: F1 en el mismo sentido. Ambos puntos hallados se unen dando el punto de corte C, punto de aplicación de R.

c) *Sistema formado por fuerzas que no son ni coplanarias ni concurrente.*

Las fuerzas se cruzan en el espacio, pero no se cortan.

6. Momento de un vector \vec{F} respecto de un punto.

El momento de un vector \vec{F} respecto de un punto se representa por el símbolo \vec{M}_O y se define como el producto vectorial del vector distancia \vec{r} por el vector \vec{f} .

$$\vec{M} = \vec{r} \wedge \vec{F}$$

$$/ M / = / r / \cdot / F / \cdot \text{sen } \alpha$$

El vector \vec{M}_O es un vector cuya dirección es perpendicular al plano XX' y sentido determinado por la regla del sacacorchos.

Las *propiedades del momento de una fuerza* son:

1. El momento de una fuerza respecto a un punto es independiente del punto de aplicación de la fuerza, siempre que esté dentro de su línea de acción.

$$\vec{M}_A^F = \vec{r}_A \wedge \vec{F} \Rightarrow / M_A^F / = / r_A / \cdot / F / \cdot \sin \alpha$$

$$\vec{M}_B^F = \vec{r}_B \wedge \vec{F} \Rightarrow / M_B^F / = / r_B / \cdot / F / \cdot \sin \beta$$

$$\vec{M}_D^F = \vec{r}_D \wedge \vec{F} \Rightarrow / M_D^F / = / r_D / \cdot / F / \cdot \sin 90^\circ$$

Si nos fijamos bien en el dibujo, vemos que:

$$\text{- En el triángulo OAD} \Rightarrow / r_D / = / r_A / \cdot \sin \alpha$$

$$\text{- En el triángulo OBD} \Rightarrow / r_D / = / r_B / \cdot \sin \beta$$

Ello nos demuestra que el punto de aplicación de la fuerza, dentro de su línea de acción, no hace variar el valor del momento.

2. El módulo del momento de una fuerza se define como el módulo de dicha fuerza por la distancia mínima desde el punto O , considerado hasta la línea de acción de la fuerza. Esta distancia mínima $d = r_D$ se le conoce como *brazo de palanca*.
3. El momento de una fuerza respecto a un punto situado en la línea de acción de la fuerza es nulo. Esto es debido a que el ángulo es 0 y el $\sin 0^\circ = 0$.

Los momentos al considerarse vectores, pues se le puede aplicar la ley de la superposición, por lo que son susceptibles a ser sumados. Gracias a ello, podemos hallar el momento de una fuerza respecto a cualquier eje que nos den, hallando la proyección del momento sobre el eje.

$$/ M_L / = / M / \cdot / \cos \beta /$$

7. Par de fuerzas.

Un par de fuerzas es un sistema formado por dos fuerzas de igual módulo y dirección, pero de sentido contrario y con líneas de acción paralelas. Un ejemplo práctico de un par de fuerzas es el volante de un coche.

Reduciendo este sistema a un único punto C, obtenemos el siguiente resultado:

1. La sumatoria de las fuerzas es nula.
2. El momento de un par de fuerzas es la distancia entre las líneas de aplicación de ambas fuerzas por el valor de una de las fuerzas.
3. La distancia entre las líneas de aplicación se denomina brazo del par.

<p>1. Fuerzas F y - F.</p>	<p>7. Llevamos las fuerzas al punto C y calculamos la resultante.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $R = F + (- F) = 0$ </div>
<p>8. Calculamos los momentos de las fuerzas F y - F en el punto C, obteniendo:</p> $/ M_o^F / = / r_A / \cdot / F / \cdot \text{sen } \alpha$ $/ M_o^{-F} / = / r_B / \cdot / - F / \cdot \text{sen } \alpha$ $\Sigma M_o = / r_A - r_B / \cdot F \cdot \text{sen } \alpha$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $\Sigma M_o = d \cdot F$ </div>	<p>- 3 -</p>

Por tanto, llegamos a la conclusión de que un sistema “ par de fuerzas ” reducido en cualquier punto, es un momento que produce un giro sin traslación. De ahí, que muchas veces se hable en vez de un par de fuerzas cuyas líneas de acción distan una distancia d, se hable de el momento de una fuerza cuyo módulo es $/ \vec{M}_o / = d \cdot / \vec{F} /$.

8. Sistemas de fuerzas mecánicamente equivalentes y sus teoremas.

Dos sistemas de fuerzas son mecánicamente equivalentes, es decir, producen el mismo efecto en un sólido rígido, sí y sólo sí, al reducirlos a cualquier punto, las componentes cartesianas de sus fuerzas resultantes R y R' son iguales, y si el momento de dichas resultantes de fuerzas es igual respecto a cualquier punto O que tomemos.

A estos sistemas de fuerzas mecánicamente equivalentes se le pueden aplicar una serie de teoremas:

8.1. Teorema nº 1.

Cualquier fuerza es mecánicamente equivalente a la misma fuerza aplicada en un punto cualquiera más un par de fuerzas, cuyo momento es igual al momento de dicha fuerza, respecto a ese punto considerado.

<p>1. Tenemos una F en A y queremos una equivalente en O.</p>	<p>2. En O, ponemos un par de fuerzas, que nos permiten suprimir F en A y $-F$ en O.</p>
<p>3. Nos da una fuerza equivalente en O, que realiza un giro del sólido rígido.</p>	

8.2. Teorema nº 2.

Este teorema se denomina teorema de la resolución de un sistema de fuerzas a un sistema de fuerzas – par. Este teorema dice:

“ Un sistema de fuerzas aplicadas a un sólido rígido es mecánicamente equivalente a, una fuerza R que resulta ser la suma vectorial de las fuerzas en un punto cualquiera O , más un par de fuerzas cuyo momento del par es la suma de los momentos de las fuerzas respecto al punto O ”.

$$\vec{R} = \sum \vec{F}_n + M_T = \sum M_n \Rightarrow \{ F_i \}$$

<p>Quedan dos vectores, $\sum F_n$ y $\sum M_n$, es decir, R y M_T, que no tienen por que formar entre sí, un ángulo de 90°.</p>	
--	--

8.3. Teorema nº 3.

Dos sistemas de fuerzas son mecánicamente equivalentes (mismos efectos), sí y sólo sí, se cumple la sumatoria de las fuerzas de un sistema es igual a la sumatoria de las fuerzas del otro sistema ($R = R'$) y si la suma de los momentos de las fuerzas en cualquier punto del sólido de un sistema es igual a la suma de los momentos del otro sistema, es decir, tienen el mismo sistema fuerza – par.

$\sum F' = \sum F'' \Rightarrow R' = R''$ $\sum M_{O_i'} = \sum M_{O_i''} \Rightarrow M_T' = M_T''$	$\Rightarrow \{ F_n \} \equiv \{ F'_n \}$
---	---

8.4. Teorema de Varignon.

Cuando las fuerzas de un sistema de fuerzas aplicadas en un sólido son concurrentes en un punto, el vector suma de los momentos respecto a otro punto O , es igual al momento del vector respecto a dicho punto O .

Estos significa que el vector momento y el vector resultante se cortan perpendicularmente entre sí.

9. Tipos de sistema de fuerzas y su resolución.

9.1. Sistema de fuerzas cuyos vectores $\vec{R} = \sum \vec{F}_n$ y $\vec{M}_{par} = \sum \vec{M}_o^{F_n}$ son perpendiculares entre sí.

A este tipo de sistema, donde \vec{R} es perpendicular a \vec{M}_{par} , se puede llegar partiendo de tres sistemas diferentes:

a) *Sistemas cuyas fuerzas son concurrentes en un punto.*

Para demostrar que $\vec{R} \perp \vec{M}_{par}$ son perpendiculares, se aplica el teorema de Varignon.

c) *Sistemas cuyas fuerzas son coplanarias.*

Se demuestra gracias “ que podemos deslizar las fuerzas sobre su línea de acción y sumarla dos a dos hasta hallar la resultante,. Luego la R es perpendicular al Mo hallado en cualquier punto, ya que, $M_o = r_R \wedge R$ ”.

d) *Sistemas de fuerzas paralelas.*

Cuando tenemos este sistema, podemos deslizar las fuerzas sobre su línea de acción hasta aplicar cada una de ellas en un plano que contenga al punto 0, del cual queremos hallar el Mo. Sabemos que R tendrá la dirección de las fuerzas paralelas y sólo hemos de hallar el módulo y el sentido total sumando los módulos de las fuerzas.

9.2. Sistemas de fuerzas cuyos vectores \vec{R} y \vec{M}_o no se cortan en ángulo recto.

Este tipo de sistema no se van analizar por ahora.

Una vez que se haya la resultante de los tres tipos de sistemas vistos anteriormente, debemos hallar el punto de aplicación de R dentro del sólido rígido. Para ello, aplicaremos unas fórmulas que se han obtenido haciendo numerosas operaciones y teniendo dos premisas fundamentales:

1. Que $\{ F_n \} = R$ y que la $R = \sum F_n$.

2. Que \vec{R} y \vec{M}_o son perpendiculares.

- Las fórmulas para las distintas coordenadas del punto son:

$$r_x = \frac{\sum r_{nx} \cdot F_{nz}}{\sum F_{nz}} \quad r_y = \frac{\sum r_{ny} \cdot F_{nz}}{\sum F_{nz}} \quad r_y = 0$$

- Donde: - r_{nx} = coordenada de x de la fuerza.
 - F_{nz} = valor de la fuerza.
 - $\sum F_{nz}$ = suma de todas las fuerzas.

10. Centro de gravedad y centro de masas.

Si consideramos a un sujeto como un sólido y el peso de cada uno de los segmentos corporales como una fuerza aplicada, podemos considerar el conjunto de dichas fuerzas como un sistema de fuerzas paralelas, de manera que, podemos sustituir todas esas fuerzas por una sóla, aplicada en un punto en concreto denominado centro de gravedad, cuyas coordenadas se pueden hallar mediante estas fórmulas.

$$CG \left(\frac{\sum x_n \cdot m_n}{m_T}, \frac{\sum x_n \cdot m_n}{m_T}, \frac{\sum x_n \cdot m_n}{m_T} \right)$$

El centro de gravedad es el punto por el cual pasan todas las líneas de gravedad de un cuerpo, independientemente de la posición de éste. El centro de gravedad del cuerpo humano sólo se puede hallar en función del tiempo. Para poder determinar el centro de gravedad del cuerpo humano debemos conocer:

- Las coordenadas del centro de gravedad de los 14 segmentos.
- Las masas parciales de los 14 segmentos.

Además, cada segmento necesita de un eje mecánico para poder hallar su centro de gravedad. Práctica en clase de biomecánica.

11. Momento angular de una partícula.

Se define como momento angular de una partícula de masa m que se mueve a una velocidad v , y que por tanto, tiene un momento lineal $m \cdot v$ respecto a un punto O cualquiera, al momento del momento lineal respecto de O .

$$I_o = r_o \times p$$

$$I_o = r_o \times m \cdot v$$

$$|I_o| = r \cdot m \cdot v \cdot \text{sen } \alpha$$

Esta fórmula aplicada a la cinemática lineal nos da otra, que se expresa:

$$I_o = m \cdot r^2 \cdot w$$

El momento angular se identifica con el símbolo I_o y expresa la cantidad de movimiento de rotación de la partícula alrededor de un punto O considerado. El momento angular presenta un teorema denominado, *teorema de la conservación del momento angular*, el cual postula que si la $\sum F$ es cero y la $\sum M$ es cero, el momento angular es constante.

$$I \cdot w = \text{ctte}$$

TEMA 9**MOMENTO DE INERCIA****1. Concepto y propiedades.**

El momento de inercia es un concepto que mide la tendencia de un cuerpo a mantener una rotación alrededor de un eje. Depende de la masa del cuerpo y de la distribución de esa masa respecto al eje considerado.

Se representa con la fórmula siguiente:

$$I_e = \sum m \cdot r^2$$

m = masa
r = distancia del cuerpo al eje

Las propiedades del momento de inercia son:

1. El momento de inercia es constante para un sólido rígido, siempre que el eje sea solidario con el.
2. Es una magnitud escalar (Kg m²) que depende del eje de rotación.
3. El momento de inercia no es constante para un cuerpo articulado, como puede ser el del ser humano.

Alguno de los momentos de inercia del cuerpo humano son:

- a) Cuerpo en posición anatómica:
 - a.1. Rotación a través del eje longitudinal: I = 1 – 1,5 Kg m².
 - a.2. Rotación a través del eje transversal: I = 10 – 13 Kg m².
- b) Cuerpo en posición de en pie, con los brazos en cruz y eje de rotación longitudinal del cuerpo: I = 2 – 3 Kg m²
- c) Cuerpo en posición agrupada y eje de rotación transversal: I = 4 – 5 Kg m².

2. Teorema de Steiner.

Este teorema nos permite hallar el momento de inercia respecto a un eje cualquiera, si conocemos el momento de inercia respecto a un eje paralelo que pase por su centro de masas.

Steiner aplica la siguiente ecuación:

$$I_e = I_{em} + m \cdot d^2$$

Que expresa, que el momento de inercia es igual al momento de inercia respecto a un eje paralelo más la masa total por la distancia total entre los ejes al cuadrado.

TEMA 10

LA MARCHA HUMANA

1. Introducción.

Entre las diversas formas de locomoción humana, la marcha es la más sencilla y habitual. Sin embargo, el proceso y los mecanismos puestos en juego para llevarla a cabo han sufrido un proceso de complejización evolutiva que no responde a la apariencia externa de “ facilidad y sencillez “; 29 grados de libertad articular, 48 músculos por cada miembro inferior, una compleja coordinación neuromuscular agonistas – antagonistas y una larga lista de complejos sistemas y elementos perfectamente integrados y coordinados se ponen en juego cada vez que andamos con un fin concreto: realizar una marcha económica y eficaz.

El criterio de eficacia viene determinado por la trayectoria del CDG, que debe ser lo más continua y sencilla posible en los tres planos (horizontal, transversal y anteroposterior).

Definiremos *la marcha* como el modo de locomoción bípeda con actividad alternante de los miembros inferiores y mantenimiento del equilibrio dinámico.

Consideramos un ciclo completa de marcha, “ desde que el talón derecho toma el contacto con el suelo hasta que vuelve a tomar contacto con él “ (100% del ciclo). Un ciclo de marcha así definidos es lo que normalmente se entiende como dos pasos.

2. Fases de la marcha.

Las fases de la marcha son las siguientes:

- a) Fase de contacto: comienza cuando el talón toma contacto con el suelo y termina cuando la punta del pie lo abandona. Se subdivide a su vez en:
 - a.1. *Amortiguamiento.*
 - a.2. *Apoyo.*
 - a.3. *Impulso.*

- b) Fase de vuelo: comienza cuando la punta del pie abandona el suelo y termina cuando el talón vuelve a tomar contacto con el mismo. Se subdivide a su vez en:
 - b.1. *Avance del miembro con oscilación.*
 - b.2. *Extensión de rodilla.*

- c) Fase del doble apoyo: es el periodo en el que coincide las fases de apoyo de ambos pies.

3. Análisis de un ciclo.

Considerando un ciclo completo de la marcha como el 100% del tiempo, veamos que periodo se dedica a cada fase:

a) Fase de contacto: desde 0 % a 65 %.

a.1. *Amortiguamiento*: desde 0 % a 10 – 15 %.

a.2. *Apoyo*: desde 10 – 15 % a 45 %.

a.3. *Impulso*: desde 45 % a 65 %.

b) Fase de vuelo: desde 65 % a 100 %.

b.1. *Avance del miembro con oscilación*: desde 65% a 80 %.

b.2. *Extensión de rodilla*: desde 80 % a 100 %.

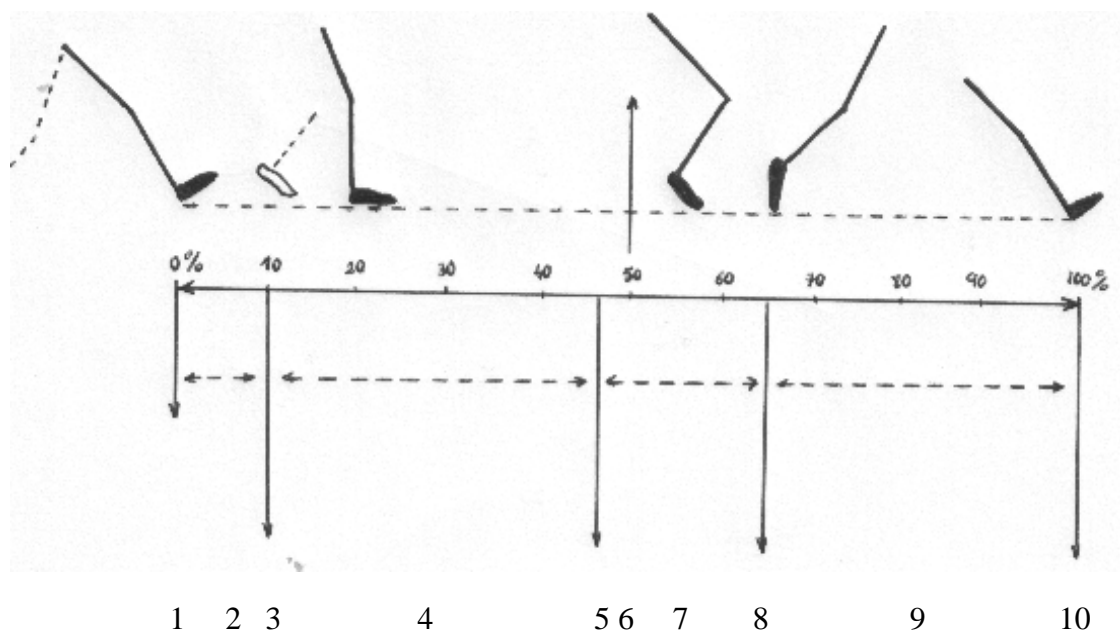
c) Fase del doble apoyo:

c.1. El primero: se da entre el 0 % hasta el 10 – 20 %.

c.2. El segundo: se da entre el 40 – 50 % hasta el 65 %.

Algunas características del ciclo completo de la marcha son:

- Cada miembro permanece en apoyo el 65 – 70 % del tiempo.
- Cada miembro permanece en vuelo el 30 – 35 % del ciclo completo.
- El apoyo bipodal dura un 20 – 40 % del ciclo.
- El apoyo monopodal dura un 60 – 80 % del ciclo.
- A mayor frecuencia, la fase de vuelo disminuye.



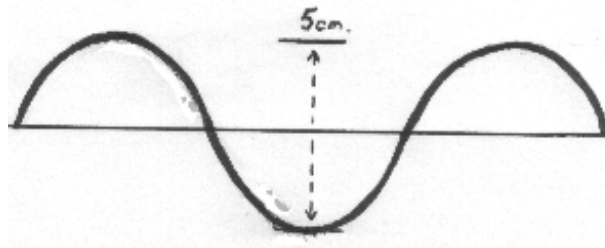
- | | |
|----------------------------|------------------------------|
| 1. Contacto talón derecho. | 6. Contacto talón izquierdo. |
| 2. Amortiguación. | 7. Impulso. |
| 3. Contacto pie. | 8. Despegue del pie. |
| 4. Apoyo. | 9. Vuelo. |
| 5. Despegue del talón. | 10. Contacto talón derecho. |

4. Cinemática de la marcha.

Dentro de este apartado analizaremos el desplazamiento que sigue el CDG durante la marcha, así como, las acciones articulares que posibilitan dicha trayectoria.

4.1. Trayectoria del centro de gravedad.

El desplazamiento del CDG sigue una trayectoria sinusoidal (de arriba - abajo, de delante – atrás y de derecha – izquierda) de una amplitud pico – pico del orden de los 5 cm. aproximadamente. Esta es la medida optima para que la marcha sea eficiente. Esta curva aparece tanto en el plano horizontal como en el sagital.



4.2. Cinemática articular.

La marcha consta de los siguientes movimientos:

1. **Rotación alternativa de la pelvis:** sus características son:

- Presenta una amplitud total de 8° de rotación interna.
- Se realiza en la articulación coxofemoral de la pierna de apoyo.
- Incrementa la distancia horizontal de avance.
- Influye en el centro de gravedad y evita 1cm. en la amplitud de su curva de desplazamiento en el plano sagital.

2. **Basculación de la pelvis:** sus características son:

- La amplitud es de 5°.
- Desciende del lado d la pierna en vuelo.
- Influye en el desplazamiento del CDG y evita 5 mm. en la amplitud de su curva de desplazamiento en el plano sagital.

3. **Flexión de la rodilla durante el apoyo:** sus características son:

- La amplitud oscila entre 15° – 20°.
- Nunca se alcanza la extensión total de la rodilla en la fase de contacto.

- Influye en la trayectoria del centro de gravedad y evita 11 mm. en la elevación del CDG en el plano sagital.

4. *Movimientos del pie y tobillo*: sus características son:

- El talón toma contacto con el suelo con 15° de flexión plantar.
- En la fase final del impulso, el pie está en 15° de flexión dorsal.
- Los movimientos del pie y tobillo, coordinados con la flexión de rodilla, terminan de suavizar la curva en el plano sagital.

5. *Desplazamiento horizontal de la pelvis*: sus características son:

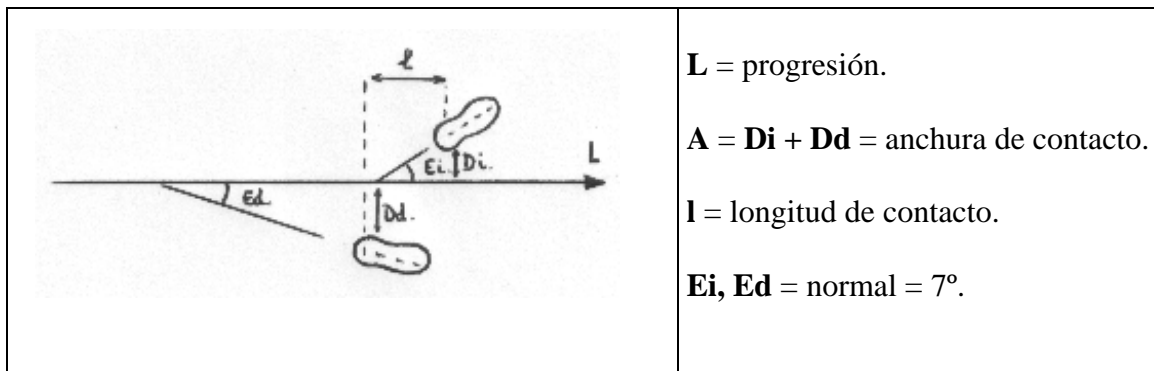
- Afecta al movimiento de aducción de la articulación coxofemoral de la pierna de apoyo y valgo de la articulación de la rodilla.
- Influye en la trayectoria del centro de gravedad y evita 25 mm. de desplazamiento horizontal en el plano frontal.

6. *Acciones en otras articulaciones*: destacan:

- *Tronco*: rotación del tronco, con oposición entre la cintura escapular y la cintura pélvica.
- *Hombro*:
 - Flexión del lado de rotación del tronco.
 - Abducción – aducción.
 - Rotación interna y externa.
- *Codo*: siempre flexionado.

5. **Otras consideraciones.**

Por último, expondremos algunos puntos que consideramos de interés para una comprensión mayor del tema. El patrón de la marcha se puede considerar como simétrico, aunque existen ligeras variaciones según se contempla:



Como investigación de referencia, se citan las conclusiones obtenidas por Chodera y Level (1973), cuyo resultado son los siguientes, en cuanto a parámetros y asimetrías:

a) *En sujetos diestros encontraron:*

- El talón izquierdo más cercano a la línea de progresión.
- Mayor ángulo de huella en el pie izquierdo.
- Menor variabilidad en el ángulo de huella del pie izquierdo.
- El pie izquierdo tiene la misión de soportar la carga, y el pie derecho, la de mantener la dirección.
- Tiene tendencia a desviarse hacia a la izquierda.

b) *En sujetos descalzos, encontraron las siguientes características de la marcha:*

- Menor anchura de huella.
- Menor variabilidad en los ángulos de huella.
- Mayor velocidad y marcha más económica.

c) *Con el envejecimiento se observó:*

- Mayor ángulo de huella.
- Mayor anchura de contacto.
- Menor longitud de paso.

6. Análisis muscular de las fases de la marcha.

1. Fase de contacto inicial.

Contacto mediante el talón con flexión de cadera, extensión de rodilla y posición neutra del tobillo. Actividad en cuádriceps, isquiotibiales y tibial anterior.

- a) *Fase de amortiguamiento*, se produce la acción del rodillo del talón bajo el control del tibial anterior.
- b) *Fase de apoyo*, se produce la acción de rodillo del tobillo bajo el control del tríceps sural.
- c) *Fase de impulso*, se produce la acción del rodillo del antepié, propiciado por una contracción potente del tríceps sural.

2. Fase del apoyo.

2.1. *Fase inicial.*

En el instante de contacto completo del pie, el cuádriceps contrarresta el momento de flexión en la rodilla y los extensores de la cadera hacen lo propio con el momento flexor en esta última articulación.

En el plano transversal, el aductor mayor tira de la pelvis hacia delante y contribuye a la extensión de la cadera. En el lado contralateral, el abductor mediano y el recto interno atraen el miembro retrasado hacia delante.

2.2. *Fase media.*

Su comienzo viene marcado por las acciones del cuádriceps y el tríceps sural. Al final de esta fase, la fuerza de reacción es ligeramente anterior a rodilla y tobillo, y únicamente el sóleo se encuentra activo.

2.3. *Fase final.*

Se produce el despegue del talón, propiciado por el tríceps sural. La cadera y la rodilla alcanzan su extensión máxima y el tobillo finaliza su flexión dorsal y flexiona plantarmente. Aquí la orientación promedio del eje formado por las cabezas de los metatarsianos es de 62 °.

3. Fase de oscilación.

3.1. *Fase previa a la oscilación.*

Se produce dorsiflexión de las metatarsofalángicas, flexión plantar del tobillo, flexión de la rodilla y de la cadera, que alcanza su posición neutra. Finaliza la acción del tríceps sural y comienza la actividad flexora en la cadera.

3.2. *Fase inicial de la oscilación.*

La elevación del miembro se produce como consecuencia de la flexión en masa de todo el miembro inferior.

3.3. *Fase media de la oscilación.*

La separación pie – suelo es mínima. Persiste la actividad flexora en cadera y dorsiflexora en tobillo, y la tibia gira como un péndulo en torno a la rodilla.

3.4. *Fase final de la oscilación.*

La cadera está en flexión, la rodilla en extensión y el tobillo en posición cercana a la neutra. Se registra actividad en el cuadriceps, isquiotibiales y musculatura pretibial.

TEMA 11

BIOMECANICA DEL MIEMBRO INFERIOR LA CADERA

1. Introducción.

Es la articulación proximal del miembro inferior, cuya función es orientarlo en todas las direcciones del espacio. Está dotada de tres ejes y de tres grado de libertad de movimientos. Los movimientos de la cadera la lleva a cabo una sólo articulación denominada articulación coxofemoral, que es una enartrosis. Sus movimientos son:

1. Eje transversal: se dan los movimientos de:

a) *Flexión*: movimiento que lleva la cara anterior del muslo al encuentro del tronco. La amplitud de la flexión depende de unos factores:

- **La flexión activa**: no es tan amplia como la pasiva. La posición de la rodilla interviene en la amplitud de la flexión de cadera, ya que si la rodilla está en extensión, la flexión es de 90° , mientras que si la rodilla está en flexión, la flexión es mayor de 120° .
- **La flexión pasiva**: sobrepasa siempre los 120° , pero la posición de rodilla también influye como en flexión activa. Con rodilla flexionada puede sobrepasar 140° .

b) *Extensión*: movimiento que lleva al miembro inferior por detrás de la línea vertical del tronco. Su amplitud es más reducida que la flexión debido a la tensión del ligamento ileofemoral y a los siguientes factores:

- **La extensión activa**: es de menor amplitud que la pasiva. Con rodilla en extensión, la extensión alcanza los 20° .
- **La extensión pasiva**: tiene lugar al adelantar una pie, inclinando el cuerpo hacia delante mientras el otro permanece inmóvil, es de 20° pero si se estira con fuerza se puede llegar hasta 30° .

2. Eje anteroposterior: se dan los movimientos de:

a) *Abducción*: movimiento que lleva al miembro inferior hacia fuera. El ángulo máximo conseguido es de 90° , deduciéndose que a cada cadera le corresponde una amplitud de 45° .

Es posible conseguir un aumento notable de la amplitud máxima de la abducción por entrenamiento llegando a una abducción activa de $120 - 130^\circ$. En cuanto a la abducción pasiva se puede conseguir los 180° .

b) *Aducción*: movimiento que lleva al miembro inferior hacia dentro. En posición anatómica, los dos miembros inferiores se hallan en contacto, por

lo que este movimiento no se produce. Para que se de, es necesario que vaya acompañada de otros movimientos. Sea cual sea, la amplitud es de 30°.

3. Eje vertical: se dan los movimientos de:

- a) *Rotación externa*: movimiento que conduce la punta del pie hacia fuera. Su amplitud es de 60°, tomada desde la posición de boca abajo con la rodilla flexionada 90°.
- b) *Rotación interna*: movimiento que conduce la punta del pie hacia dentro. Su amplitud es de 30°, tomada desde la posición de boca abajo con la rodilla flexionada 90°.

4. Combinación de los tres ejes: se da el movimiento de circunducción. Cuando la circunducción llega a su amplitud extrema, el eje del miembro inferior describe en el espacio un cono, denominado cono de circunducción, cuyo vértice está ocupado por el centro de la articulación coxofemoral.

2. Descripción anatómica de la cadera.

La articulación coxofemoral es una enartrosis, que presenta una gran estabilidad, capacidad muy importante ya que debe contrarrestar las fuerzas de reacción que se produce a su nivel como consecuencia del peso del cuerpo contra el suelo. Esta estabilidad no le resta en su movilidad.

Esta articulación une dos superficies articulares, las cuales son: La cabeza del fémur y la cavidad cotiloidea de la pelvis. El ángulo formado entre ambos ejes en su unión es de 125°.

La cabeza del fémur y el propio fémur están formado por tejido compacto muy resistente a la compresión estática y dinámica, siendo así muy difícil de romper. Además la cavidad cotiloidea, limitada por la ceja cotiloidea, favorece la colocación de la cabeza del fémur con lo que es casi imposible que se luxa.

Pero por si fuese poco con estas capacidades, la articulación coxofemoral presenta unos seguros anatómicos, a través de una serie de ligamentos y músculos, que aumentan su estabilidad, tales como:

- *Ligamento redondo*: situado en el trasfondo cotiloideo. Sujeta la cabeza del fémur. Limita el movimiento de abducción.
- *Cápsula articular y sus fibras*: une al fémur con el coxal, insertándose por debajo del macizo tracantéreo. Los haces que intervienen son el longitudinal, el oblicuo, el trasverso, el circular y el arciforme.
- *Los ligamentos ileofemorales, los isquiofemorales y los pubofemorales*. En bipedestación, estos ligamentos limitan la extensión.

- *Determinados músculos* que sale del macizo traçantereo y se sujetan alrededor de la cabeza y cuello del fémur.

3. Los músculos que intervienen en los movimientos de la cadera.

3.1. Los músculos flexores de la cadera.

Estos músculos para ser flexores deben pasar por delante del eje transversal. Analizado uno por uno, nos da el siguiente resultado:

- *Psoas – iliaco*: es el de mayor potencia en la flexión. Además actúa de rotador externo y de aductor.
- *Sartorio*: es flexor de la cadera y de manera accesoria abductor y rotador externo.
- *Recto anterior del cuadriceps*.
- *El tensor de la fascia lata*: favorece el movimiento de flexión más abducción.

Algunos músculos poseen, de modo secundario, un componente de flexión sobre la cadera, tales como:

- El pectíneo, el aductor mediano, el recto interno y los fascículos anteriores de los glúteos menor y mediano.

Sirva de ejemplo que golpear un balón de fútbol con la cara externa del pie, es un movimiento de flexión + rotación interna + abducción, donde intervienen el tensor de la fascia lata y el sartorio como máximo exponente.

3.2. Los músculos extensores de la cadera.

Estos músculos para ser extensores deben pasar por detrás del eje transversal. Analizado uno por uno, nos da el siguiente resultado:

- *Glúteo mayor*: es el más potente. Va acompañado de los fascículos glúteo mediano y menor. Además es rotador externo.
- Los isquiotibiales, concretamente el bíceps largo, el semimembranoso, el semitendinoso y el tercer fascículo del aductor mayor.

Debemos saber que la basculación de la pelvis hacia delante y atrás es controlada por el ligamento de Bertin, por lo que limita la extensión. El movimiento de subir las escaleras es controlado por los isquiotibiales y el glúteo mayor.

3.3. Los músculos abductores de la cadera.

Estos músculos para ser abductores deben pasar por fuera del eje frontal. Analizado uno por uno, nos da el siguiente resultado:

- *Deltoides glúteo*: es el motor principal de la abducción. Este complejo muscular está formado por el glúteo mayor, mediano y menor, y por el tensor de la fascia lata.
- Todos estos músculos poseen un componente estabilizador de la articulación.
- Para que la pelvis en el apoyo monopodal esté en equilibrio, actúan los abductores de la pierna de apoyo.
- Para que la pelvis en el apoyo bipodal esté en equilibrio, actúan los abductores de la pierna de apoyo y los aductores de la pierna que no está en apoyo, de forma simultánea.

3.4. Los músculos aductores de la cadera.

Estos músculos para ser aductores deben pasar por dentro del eje frontal. Analizado uno por uno, nos da el siguiente resultado:

- *El aductor mayor*: es el más potente.
- También intervienen de forma ligera otros músculos, tales como: el recto interno, el semimembranoso, el semitendinoso, el bíceps largo, el glúteo mayor, el cuadrado crural, el pectíneo, el obturador interno, el obturador externo, el aductor mediano, el aductor menor y el recto interno.

3.5. Los músculos rotadores externos de la cadera.

Estos músculos para ser rotadores externos deben pasar por detrás del eje vertical. Analizado uno por uno, nos da el siguiente resultado:

- *Los pelvitrocantéreos*: dentro de este grupo destacan, el piramidal, el obturador interno y externo y el géminos.
- *Del grupo de los aductores*: el cuadrado crural, el pectíneo y los fascículos posteriores del aductor mayor.

3.6. Los músculos rotadores internos de la cadera.

Estos músculos para ser rotadores internos deben pasar por delante del eje vertical. Analizado uno por uno, nos da el siguiente resultado:

- *El tensor de la fascia lata.*
- *El glúteo menor.*
- *El glúteo mediano.*
- *En la línea media y por detrás, también están el aductor mayor, el mediano y el menor, la porción larga del bíceps y el piramidal.*
- Debemos saber que en función de la colocación de las fibras, unos músculos como el piramidal harán o rotación interna o externa. A esto se le llama la inversión de las acciones musculares.

TEMA 12

LA RODILLA

1. Introducción.

La rodilla es la articulación intermedia del miembro inferior. Es una articulación dotada de 2 sentidos de libertad de movimiento, como es la flexión y la extensión por un lado; y la rotación sobre el eje longitudinal de la pierna, que solo aparece cuando la rodilla está en flexión, por el otro.

Desde el punto de vista mecánico, de la rodilla podemos decir que compagina dos aspectos contradictorios:

- Posee una gran estabilidad.
- Alcanza una gran movilidad.

La unión del cuello femoral con la tibia y el peroné, no forma un ángulo perfecto que siga la prolongación del eje de la pierna, si no que forma un ángulo obtuso de 170° , lo que se denomina como el *valgus fisiológico de la rodilla*.

2. Los ejes de la articulación de la rodilla, sus movimientos y sus grados.

1.1. Eje transversal:

El primer sentido de libertad de movimiento son los de flexión y extensión. Estos movimientos se dan en el eje que atraviesa los cóndilos femorales en sentido horizontal.

- a) **La extensión:** no existe una extensión absoluta, no obstante se puede efectuar sobre todo de forma pasiva un movimiento de extensión de 5 a 10° , a partir de la posición de referencia; este recibe el nombre de ***hiperextensión***.
- b) **La flexión:** la amplitud de flexión de la rodilla es distinta según sea la posición de la cadera:
 - ***La flexión activa*** alcanza los 140° si la cadera está en flexión previa y tan solo llega a 120° si la cadera se encuentra en extensión. Esta diferencia de amplitud se debe a la disminución de la eficacia de los isquiotibiales cuando la cadera esta en extensión.
 - ***La flexión pasiva*** alcanza una amplitud de 160° y permite que el talón entre en contacto con la nalga.

2.2. Eje longitudinal:

El segundo sentido de libertad de movimiento consiste en la rotación pero con la rodilla en flexión. La rotación es *imposible cuando la articulación se encuentre en extensión completa*.

La rotación interna conduce la punta del pie hacia dentro e interviene en el movimiento de aducción del pie. **La rotación externa** lleva la punta del pie hacia fuera e interviene en el movimiento de abducción del pie.

Para FICK, la rotación externa es de 40°- 50° contra los 30° - 35° de la interna.

Existe también **una rotación axial llamada automática**, porque va unida a los movimientos de flexión-extensión de manera involuntaria e inevitable. Tiene lugar al final de la extensión y al comienzo de la flexión.

2.3. Eje anteroposterior:

Un tercer sentido de libertad de movimiento, con la rodilla en flexión son los movimientos de lateralidad, que en el tobillo alcanzan de 1 a 2 cm de amplitud pero en la extensión completa desaparecen.

3. Los desplazamientos laterales de la rodilla.

El ángulo de valgus sufre variaciones patológicas según los individuos:

- Cuando el ángulo de valgus se invierte, existe un ***genu varum***, y se dice que es patituerto. El centro de la rodilla se desplaza hacia fuera. El genu varum puede apreciarse de 2 maneras:
 - *Por la medición del ángulo* entre el eje diafisiario del fémur y el de la tibia; es más grande que su valor fisiológico de 170°, es decir será de unos 180-185°
 - *Por la medición del desplazamiento externo* del centro de la rodilla con relación al eje mecánico del miembro inferior.
- Cuando el ángulo de valgus se cierra, hablamos de ***genu valgum*** y se dice que el individuo es patizambo. Para apreciar el genu valgum se puede apreciar por 2 métodos:
 - *Por la medición del ángulo* de los ejes epifisarios, donde su valor se sitúa por debajo del ángulo fisiológico de 170°.
 - *Por la medición del desplazamiento interno* del centro de la rodilla con relación al eje mecánico del miembro inferior.

4. Descripción anatómica de la rodilla.

La rodilla es una articulación con un grado de libertad. Está formada por dos articulaciones:

- a) *Femorotibial*: unión de los dos cóndilos femorales con las dos cavidades glenoideas de la meseta tibial. Las dos glenoides están separadas por la cresta tibial y su posición varía en función de los cóndilos, aunque el caso

más normal es: Glenoides cóncavas hacia arriba y cóndilos convexos hacia abajo. Los grados de cada uno de los radios de curvatura de los cóndilos son:

- Radio curvatura en cóndilo externo: 60°.
- Radio de curvatura en cóndilo interno: 38°.

b) *Femoropatelar*: unión de la escotadura intercondílea con rótulo. Intervienen los ligamentos cruzados y presenta una cápsula articular revestida de cartílago hialino.

5. Los movimientos de los cóndilos sobre las glenoides en la flexión-extensión.

La flexión y la extensión se producen en la rodilla gracias a que los cóndilos realizan dos funciones: 1° ruedan sobre sí y 2° se deslizan sobre los cóndilos.

La longitud de rodadura pura que se da al comienzo de la flexión es distinta según el cóndilo que se considere: para el cóndilo interno dicha rodadura solo aparece durante los 10-15° iniciales de la flexión, y para el cóndilo externo la rodadura persiste hasta los 20° de flexión.

Estos 15 ó 20° de rodadura inicial corresponden a la amplitud habitual de los movimientos de flexión - extensión que se realiza en la marcha normal.

6. Movimientos de los cóndilos sobre las glenoides en los movimientos de rotación axial.

En la rotación externa de la tibia bajo el femur, el cóndilo externo avanza sobre la glenoide externa mientras que el cóndilo interno retrocede en la glenoide interna.

En la rotación interna el cóndilo externo retrocede en su glenoide mientras que el interno avanza sobre la glenoide interna.

7. La cápsula articular y los ligamentos de la rodilla.

La capsula articular es un manguito fibroso que envuelve la extremidad inferior del femur y la extremidad superior de la tibia, manteniéndolas en contacto entre sí formando las paredes no óseas de la cavidad articular.

Los ligamentos de la rodilla son:

1. *Ligamento adiposo*: ligamento que se dirige hacia abajo y a dentro de la rótula. Tiene forma de pirámide y sus puntos de fijación son: la parte anterior y superior de la escotadura intercóndilea y la parte posterior e inferior de la rótula.
2. *Ligamento rotuliano*: también conocido como ligamento yugal.

3. *Ligamento cruzado antero – externo*: se fija en la parte anterior de la tibia y en la cara externa del cóndilo externo. En la flexión, este ligamento es responsable del deslizamiento del cóndilo hacia delante. Impide la rotación interna con la rodilla en extensión.
4. *Ligamento cruzado postero – interno*: se fija en la parte posterior de la tibia y en la cara interna del cóndilo interno. En la extensión, éste ligamento es responsable del deslizamiento del cóndilo hacia atrás. Impide la rotación interna con la rodilla en extensión.
5. *Ligamento semimembranoso*.
6. *Ligamento aleros meniscos rotulianos*: van a los lados del menisco y ayudan a mantener una estabilidad transversal de la rótula.
7. *Ligamentos laterales internos y externos*: ambos se tensan en la extensión y se distienden en la flexión. Se fijan en la cara posterior del cóndilo hacia la cabeza del peroné (externo) y en la cara posterior media del cóndilo interno hacia la tibia (interno). Impiden la rotación externa con la rodilla en extensión.
8. *Ligamentos femoro – rotulianos*: constituyen dos grandes alerones en la rótula.

8. Meniscos interarticulares y sus comportamientos durante los movimientos.

La no concordancia de las superficies articulares esta compensada por la interposición de los **meniscos**. Los meniscos se interponen entre los cóndilos y glenoides, excepto en el centro de cada glenoide y a nivel de las espinas tibiales.

1. Desplazamientos de los meniscos en la flexión- extensión.

Durante la extensión, las aletas meniscorrotulianas, se tensan por el avance de la rótula que arrastra al ligamento yugal, tirando de los meniscos hacia delante. La tensión del ligamento meniscofemoral simultanea la tensión del ligamento cruzado posterointerno, impulsa hacia delante al cuerno posterior del menisco externo.

Durante la flexión el menisco externo es impulsado hacia atrás por la expansión del popliteo y el menisco interno es impulsado hacia atrás por la expansión del semimembranoso, que se inserta en su reborde posterior, mientras que el cuerno anterior es atraído por las fibras del cruzado anteroexterno.

2. Desplazamiento de los meniscos en la rotación axial.

En la rotación externa de la tibia bajo el femur, el menisco externo está impulsado hacia la parte anterior de la glenoide externa, mientras que el menisco interno es conducido hacia atrás.

En la rotación interna, el menisco interno avanza mientras el externo retrocede.

9. Los músculos que participan en la rodilla.

1. Los músculos flexores.
2. Los músculos extensores.
3. Los músculos rotadores.

TEMA 13

EL TOBILLO

1. Introducción.

La articulación tibio – peroneo - astragalina constituye el tobillo que también forma parte del miembro inferior, y que, por tanto, le influye en la movilidad en la *flexo - extensión* (eje y), en la *Inversión* (supinación – aducción – rotación interna) y en la *eversión* (pronación – abducción – rotación externa) junto con la articulación del tarso, y la estabilidad por las fuerzas de reacción.

- **Flexo - Extensión:** hay diferencias grandes entre los sujetos pero depende sobre todo de la flexibilidad del Tendón de Aquiles:

Extensión: de 30 a 50°, Flexión: de 20° a 30°.

- **Inversión - Reversión:** son los movimientos de prolongación del eje mecánico de la pierna:

Inversión: supinación + aducción + Rot interna.

Eversión: Pronación + abducción + Rot externa.

2. Estructuras anatómicas articulares.

2.1. Mortaja tibio – peroneo – astragalina.

Es la articulación de la epífisis distal de la tibia y el peroné con la cabeza del astrágalo. Es una polea.

2.2. Superficie articular.

Por encima y por los lados de la polea astragalina: *Triple articulación:*

1. *Peroneo – astragalina:* cara interna del maleolo peroneal y cara externa de la polea astragalina.
2. *Tibio – astragalina:* cresta de la Polea- garganta de la tibia; cara interna de la Polea- cara externa del maleolo tibial.
3. *Polea:* tiene una estructura que se ensancha por los que empieza a crecer y se producen ciertas separaciones del peroné sobre la tibia sobre todo en el movimiento de flexo - extensión

3. Ligamentos del movimiento.

- Ligamento lateral externo: tiene tres fascículos: (2 van al astrágalo y otro al calcáneo):

- *Haz Anterior*: del borde lateral del maleolo peroneo va oblicuamente abajo y adelante para insertarse en el astrágalo, entre la carilla externa y la apertura del seno del tarso.
- *Haz Medio*: en el punto más prominente del maleolo, va abajo y atrás y se inserta en la cara externa del calcáneo.
- *Haz Posterior*: origen en la cara interna del maleolo, por detrás de la carilla articular, para dirigirse horizontalmente hacia dentro y ligeramente atrás para insertarse en el tubérculo posteroexterno del astrágalo.
- Ligamentos que parten del maleolo interno: hay dos fascículos, uno el profundo (haces tibioastragalinos) y otro más superficial (lig deltoideo):
 - *Haz tibioastragalino anterior*: oblicuo hacia abajo y adelante, se inserta en la rama interna del yugo astragalino.
 - *Haz tibioastragalino posterior*: oblicuo hacia abajo y atrás se inserta en la fosita profunda debajo de la carilla interna del astrágalo.
 - *Ligamento deltoideo*: plano superficial muy extenso y triangular. Desde su origen tibial se expande al borde interno del ligamento glenoideo y la apófisis menor del calcáneo, no tiene inserción en el astrágalo.
- Ligamentos anterior y posterior de cierre: son simples engrosamientos capsulares. El *Anterior*: une oblicuamente el margen anterior de la superficie tibial y la rama de la bifurcación posterior del yugo astragalino. El *Posterior*: está formado por fibras de origen tibial y peroneo que convergen hacia el tubérculo posterointerno del astrágalo.

4. Movilidad y estabilidad del tobillo.

Depende de varias estructuras:

1. Sabiendo que la superficie tibial tiene un desarrollo de 70° de arco y que la polea astragalina se extiende de 140° a 150° se puede deducir que la amplitud global de la fleoextensión es de 70° a 80° , el predominio de la extensión sobre la flexión se debe a que el desarrollo de la polea es mayor por detrás que por delante.
2. *Limitación de la flexión*: depende de factores óseos (la cara superior del cuello del astrágalo impacta contra el margen anterior de la superficie tibial), factores capsuloligamentosos (la parte posterior de la cápsula se tensa y también los haces posteriores de los ligamentos laterales), y factores musculares (resistencia tónica del músculo tríceps) y otro dentro de este último es el Tendón de Aquiles.

3. *Limitación de la extensión:* depende de factores óseos: (tubérculos posteriores del astrágalo contacta con el margen posterior de la superficie tibial, factores capsuloligamentosos (la parte anterior de la cápsula se tensa al igual que los haces anteriores de los ligamentos laterales), factores musculares (la resistencia tónica de los músculos flexores limitan en primer lugar la extensión. La hipertonia de los flexores provocan una flexión permanente (pie talo).
4. *Estabilidad Transversal:* la tibiotarsiana es una articulación dotada de un solo grado de libertad, ya que su propia estructura le impide cualquier movimiento alrededor de uno de sus otros dos ejes. Esta estabilidad se debe a un **estrecho acoplamiento**, verdaderamente unión entre espiga y mortaja: la espiga astragalina está bien sujeta en la mortaja tibioperonea. Cada rama de la pinza bimaleolar sujeta lateralmente al astrágalo, siempre que la separación entre maleolo externo y el interno permanezca inalterable. Esto supone, además de la integridad de los maleolos, la de los ligamentos peroneotibiales inferiores. Además, los potentes ligamentos laterales externo e interno impiden cualquier movimiento de balanceo del astrágalo sobre su eje longitudinal.

5. Músculos Motores de la Flexo-extensión.

5.1. Flexores.

- **Por dentro:** extensor propio del dedo gordo y tibial anterior, cuanto más alejados del eje transversal serán más supinadores y aductores.
- **Por fuera:** extensor común de los dedos y peroneo anterior. Son abductores y pronadores al mismo tiempo.

5.2. Extensores.

Son aquellos músculos que pasan por detrás del eje transversal de flexoextensión.

- **Plano superficial:** gemelos y sóleo (tríceps sural, inserción en calcáneo, tendón de Aquiles).
- **Cara externa:** peroneo lateral corto, peroneo lateral largo estos dos son abductores a la vez que pronadores.
- **Cara interna:** tibial posterior, flexor propio del dedo gordo y flexor común de los dedos. Son aductores a la vez que supinadores.

TEMA 14

BÓVEDA PLANTAR

1. Introducción.

La bóveda plantar es una compleja estructura que asocia con armonía todos los elementos osteoarticulares, ligamentosos y musculares del pie. Es capaz de adaptarse a cualquier irregularidad y transmitir al suelo las fuerzas y el peso del cuerpo en las mejores condiciones mecánicas. Es el amortiguador indispensable para la flexibilidad de la marcha

La Bóveda Plantar se compone principalmente de tres arco delimitados por *tres puntos* de apoyo:

- Cabeza del primer metatarsiano. (30% del peso)
- Cabeza del quinto metatarsiano. (20% del peso)
- Tuberosidades posteriores del calcáneo. (50% del peso)

Cada punto de apoyo es común a dos de los arcos que delimitan la bóveda plantar:

1. **ARCO ANTERIOR:** el más corto y bajo, se localiza entre la cabeza del primer metatarsiano (descansando el peso sobre los dos sesamoideos a 6 mm del suelo) y la cabeza del quinto metatarsiano (también a 6 mm del suelo). Este arco pasa por la cabeza de otros metatarsianos:

La segunda cabeza la más elevada a 9 mm constituye la clave de la Bóveda Plantar la tercera (8,5 mm) y la cuarta cabeza a 7 mm están en una posición intermedia.

La concavidad de este arco está poco acentuada y contacta con el suelo a través de las partes blandas constituyendo los que se denomina: *talón anterior del pie*.

El arco anterior se desploma con frecuencia (antepié plano, antepié convexo) lo que provoca la formación de callos debajo de las cabezas metatarsianas descendidas.

- **Músculos:**

Tres músculos sujetan la curva transversal de la bóveda:

- Abductor del dedo gordo.
- Peroneo lateral largo (actúa sobre los tres arcos), aquí es un tensor oblicuo.

- Expansiones plantares del tibial posterior: papel elástico y tensor oblicuo hacia delante y atrás.
- La curva longitudinal del conjunto está controlada por el abductor del dedo gordo por dentro mas el flexor propio y por el abductor del quinto dedo por fuera.

2. **ARCO INTERNO:** se localiza entre la cabeza del primer metatarsiano y las tuberosidades posteriores del calcáneo. Incluye cinco elementos óseos de delante atrás:

- Primer metatarsiano (contacta con el suelo por su cabeza).
- Primera cuña (sin contacto con el suelo).
- Escafoides, clave de la bóveda se localiza a 15-18 mm del suelo.
- El astrágalo recibe las fuerzas transmitidas por la pierna y las reparte por la bóveda.
- Calcáneo cuyo contacto con el suelo es mediante su extremo posterior.

El Arco Interno conserva su concavidad gracias a los ligamentos y músculos que traccionan de él. Numerosos ligamentos unen las piezas óseas y resisten todas las fuerzas violentas aunque de corta duración a la inversa que los músculos que se oponen a deformaciones prolongadas.

- **Músculos.**

Los *Músculos* que unen dos puntos más o menos alejados del arco forman cuerdas parciales o totales y actúan como tensores: *tibial posterior*, *peroneo lateral largo*, *flexor propio del dedo gordo*, *abductor del dedo gordo*.

3. **ARCO EXTERNO:** Se localiza entre la cabeza del 5º metatarsiano y las tuberosidades posteriores de calcáneo. Incluye 3 elementos óseos:

- Quinto metatarsiano cuya cabeza constituye el punto de apoyo del arco anterior.
- El cuboides, sin contacto alguno con el suelo.
- El calcáneo cuyas tuberosidades posteriores son el punto de apoyo posterior del arco exterior.

Este arco está poco distanciado del suelo (3-5 mm) y contacta con el suelo a través de las partes blandas.

La transmisión de fuerzas mecánicas se realiza a través del astrágalo, sujeto al calcáneo mediante dos sistemas trabeculares (trabéculas posteriores y trabéculas anteriores).

El *arco externo* es mucho más rígido que el interno para así poder transmitir todo el impulso motor del tríceps.

- **Músculos tensores del arco externo.**

- Peroneo lateral corto: impide el bostezo inferior de las articulaciones.
- Peroneo lateral largo: igual que el corto pero también sujeta elásticamente su extremo anterior como el flexor propio del dedo gordo en el lado interno.
- Abductor del quinto dedo.

2. Deformaciones dinámicas de la bóveda en la marcha.

La marcha es una cara dinámica puesto que la transmisión del peso del cuerpo durante el paso produce sobrecargas y deformaciones sobre la bóveda. Esto va a ser posible gracias a que la bóveda tienen capacidad amortiguadora elástica.

Vamos a estudiar el paso en cuatro tiempos:

⇒ **Primer tiempo:** *toma de contacto con el suelo.*

El pie al tomar contacto con el suelo por el talón, con una ligera flexión de tobillo.

Una vez apoyados el talón, tomamos contacto con el resto del pie llevando el tobillo a la extensión.

⇒ **Segundo tiempo:** *contacto máximo.*

El tobillo pasar de forma pasiva de estar en extensión a flexión debido a que el cuerpo va a pasar por encima y por delante de este pie.

Durante este momento el peso del cuerpo se apoya sobre la totalidad de la bóveda plantar que se aplaza y alarga. A este aplastamiento se oponen los músculos tensores plantares.

Al iniciar el movimiento, el apoyo anterior avanza mientras que una vez este apoyo es fijado por el peso del cuerpo el apoyo posterior retrocede. La superficie de impresión plantar es máxima cuando la pierna pasa por la vertical del pie a punto de.

⇒ **Tercer tiempo:** *primera incursión motrices.*

En este momento el peso del cuerpo se encuentra por delante del pie de sustentación, el talón se eleva por la acción de los extensiones y la articulación del tobillo se extiende de forma activa.

La bóveda, por su parte, rota alrededor del primer metatarsiano y está sometido a tres fuerzas: la del suelo, la de los extensores desde tobillo y el peso del cuerpo. Si los extensores de la bóveda no actuaran, está tendería a aplastarse gracias a su acción la bóveda tiene efecto amortiguador que permite reservar una parte de la fuerza del tríceps para restituirla al terminar el impulso. El arco anterior se aplastada y se ensancha.

⇒ **Cuarto tiempo:** *segunda impulsión motriz.*

El talón sigue el recorrido hacia arriba y delante por acción de los flexores de los dedos, levantando el talón anterior y descansa sobre los tres primeros dedos.

La bóveda, gracias a los pintores plantares, no sé de forma y cuando el pie vuelve al aire recuperar su posición normal.

3. Adaptación de la bóveda plantar al terreno.

La adaptación de la bóveda el terreno se produce por la función de sostén de los músculos que lo forman, y el ahuecamiento que generan. En terrenos hasta los la bóveda se ahueca para su adaptación y aparte.

En terrenos lisos, la bóveda se adapta de forma diferente según la inclinación del terreno:

- En terrenos inclinados hacia afuera, el apoyo anterior del pie es más extenso.
- En terrenos con inclinación transversal el pie de abajo hace una supinación y el de arriba una eversión.
- En escalada el pie de abajo, mientras que el pie de arriba llega a la flexión máxima y paralelo a la inclinación.
- En descenso el pie toma posición de inversión para obtener una adherencia máxima.

TEMA 15

EL RAQUIS EN SU CONJUNTO

1. El raquis, eje sostenido.

El raquis, eje del cuerpo, debe conciliar dos imperativos mecánicos contradictorios: la **rigidez** y la **flexibilidad**. Puede hacerlos gracias a su estructura sostenida. El raquis puede ser considerado como el mástil de un navío. Este mástil, apoyado en la pelvis, se eleva hasta la cabeza a nivel de los hombros y soporta a la cintura escapular. En todos los tramos hay *tensores ligamentosos y musculares*, uniendo el mástil con su base de implantación, la pelvis.

En la posición simétrica, las tensiones están equilibradas a ambos lados y el mástil es vertical y rectilíneo.

En la posición de reposo sobre una pierna, cuando el peso del cuerpo descansa sobre un solo miembro inferior, la pelvis bascula hacia el lado opuesto y el raquis se ve obligado a seguir un trayecto sinuoso: primero convexo en su parte lumbar hacia el lado del miembro relajado, y luego, cóncavo en su porción dorsal, para terminar convexo. La flexibilidad del eje raquídeo se debe a su constitución por *múltiples piezas superpuestas*, unidas entre sí mediante elementos ligamentosos y musculares.

2. El raquis, eje del cuerpo y protector del eje nervioso.

La columna vertebral forma el **pilar central del tronco**. En su *porción dorsal*, el raquis se aproxima al plano posterior y se halla situado en la cuarta parte del espesor del tórax. En su *porción cervical*, el raquis es ya más central y está situado en el tercio del espesor del cuello. En su *porción lumbar*, el raquis es verdaderamente central, puesto que está situado en la mitad del espesor del tronco. Esta diferencia de situación se explica por razones que varían según el tramo.

En la porción cervical, el raquis soporta el cráneo y debe estar lo más cerca posible de su centro de gravedad; en su porción dorsal el raquis va hacia atrás por los diferentes órganos como por el corazón; en su porción lumbar debe soportar el peso de toda la parte superior del tronco.

Además el raquis asume el papel de **protector del eje nervioso**: el canal raquídeo que comienza a nivel del agujero occipital, alberga al bulbo y la medula representa de este modo un protector flexible y eficaz de este eje nervioso.

3. Las curvaturas del raquis tomadas en su conjunto.

Tomada en conjunto, la columna vertebral es rectilínea *de frente o de espaldas*. Algunos individuos pueden presentar alguna ligera curvatura transversal sin llegar a ser patológica.

Sin embargo, vista la columna vertebral desde un plano sagital, ésta presenta cuatro curvaturas que son (de arriba abajo):

- **Curvatura sacra**, que es fija a causa de la soldadura de las vértebras sacras. Esta curvatura es de cavidad anterior.
- **Lordosis lumbar**, de concavidad posterior.
- **Cifosis dorsal**, de convexidad posterior.
- **Lordosis cervical**, de concavidad posterior.

La importancia de las curvaturas se determina por *flechas*, es decir, la distancia entre el plano vertical y la parte más prominente de las curvaturas.

4. La aparición de las curvas raquídeas.

Durante la *filogénesis*, es decir, en el curso de la *evolución de la raza humana* a partir de los prehomínidos, el paso de la posición de cuadrupedia a la bipedestación indujo al enderezamiento y después la inversión de la curvatura lumbar, inicialmente cóncava hacia delante; así fue como apareció la *lordosis lumbar* cóncava hacia atrás.

Durante la *ontogénesis*, es decir, durante el *desarrollo del individuo* vemos como se realiza la misma evolución a nivel del raquis lumbar. A la edad de 1 día, el raquis lumbar es cóncavo hacia delante; a la de 5 meses la curvatura sigue siendo ligeramente cóncava hacia delante; solo a los 13 meses, el raquis se hace rectilíneo. A partir de los 3 años se aprecia una ligera lordosis lumbar que se afirma ya a los 8 años y adopta su curvatura definitiva a la edad de diez años. La evolución del individuo es, por tanto, paralela a la evolución en la especie.

5. Constitución de la vértebra tipo.

La *vértebra tipo* está compuesta por dos partes principales:

El *cuero vertebral* por delante y ↑ el *arco posterior* por detrás.

- El *cuero vertebral* es la parte más gruesa de la vértebra; tiene, en general, una forma cilíndrica menos alta que ancha con una cara posterior cortada.
- El *arco posterior* tiene forma de herradura.

A ambos lados de este arco posterior se fija el macizo de las *apófisis articulares*, con lo que se delimitan dos partes en el mismo: por una, delante del macizo de las articulares se sitúan los *pedículos*; por otra y detrás del macizo de las articulares se sitúan las *láminas*; en la línea media, por detrás, se fija la *apófisis espinosa*. Además la vértebra esta constituida por las *apófisis transversas* que se sueldan al arco posterior casi a la altura del macizo de las articulares.

A lo largo del raquis se establecen **tres columnas**: ← *Una columna principal* por delante formada por el apilamiento de los cuerpos vertebrales; ↑ y → *Dos columnas secundarias*, por detrás del cuerpo vertebral, formadas por el apilamiento de las apófisis articulares.

Los cuerpos vertebrales están unidos entre sí por el *disco intervertebral*; las apófisis articulares lo están mediante articulaciones del tipo de las artrodias. En cada tramo hay un *orificio vertebral* delimitado por el cuerpo vertebral y el arco posterior por detrás. La sucesión de todos estos orificios vertebrales constituyen a lo largo del eje raquídeo el *conducto raquídeo* formado alternativamente por partes óseas (a nivel de cada vértebra) y por partes ligamentosas (entre las vértebras a nivel del disco intervertebral y de los ligamentos del arco posterior).

6. Las curvaturas raquídeas.

La presencia de curvaturas raquídeas aumenta la resistencia del raquis a las fuerzas de comprensión axial. *La resistencia de una columna con curvaturas es proporcional al cuadrado del número de curvaturas más uno. La columna vertebral con tres curvaturas (lordosis lumbar, cifosis dorsal y lordosis cervical) tiene una resistencia diez veces mayor a la de la curvatura rectilínea.*

Se puede medir la importancia de las curvaturas raquídeas por medio del *índice raquídeo de Delmas*. Este índice consiste en la relación entre la *longitud alcanzada por el raquis* desde la cara de la primera vértebra sacra hasta el Atlas por una parte y, por otra, de la *altura* tomada entre la cara superior de S1 y el Atlas. Un *raquis con curvaturas normales* posee un índice de 95%; los límites extremos del raquis normal son del 94 y 96. Por el contrario, un *raquis con curvaturas poco acentuadas* posee un índice de Delmas inferior al 96%.

Delmas ha demostrado que el *raquis con curvaturas acentuadas es de tipo funcional dinámico*, mientras que el *raquis con curvaturas poco pronunciadas es de tipo funcional estático*.

7. Estructura del cuerpo vertebral.

El cuerpo vertebral tiene la estructura de un hueso corto, es decir, una *estructura en cascarón* con un cortical de hueso denso que rodea al *tejido esponjoso*. La cortical de cara superior y la de cara inferior del cuerpo vertebral se denomina *cara vertebral*. Ésta es más espesa en su centro, donde se haya una porción cartilaginosa. La periferia forma el *rodete marginal*. Este rodete procede del punto de osificación epifisaria. Los trastornos de osificación de este núcleo epifisario constituyen la *epifisitis vertebral* o enfermedad de Schauer mann.

El corte verticofrontal del cuerpo vertebral se distinguen espesas corticales: arriba y abajo, la cara vertebral cubierta por una capa cartilaginosa y en el centro del cuerpo vertebral, trabéculas de hueso esponjoso que se reparten siguiendo *líneas de fuerza*. Estas líneas son *verticales* y unen la cara superior y la inferior, u *horizontales*, que unen las dos corticales *laterales* o también *oblicuas*, que unen la cara inferior a las corticales laterales.

En un corte sagital aparecen de nuevo dichas trabéculas verticales, pero hay además dos sistemas de fibras oblicuas llamadas *fibras en abanico*.

El entrecruzamiento de estos tres sistemas trabeculares establece puntos de fuerte resistencia, pero también un *punto de menor resistencia*, en particular un triángulo de base anterior en el que solo existen trabéculas verticales. Esto explica la fractura cuneiforme del cuerpo vertebral. Con una fuerza de compresión axial del orden de 600 Kg. la parte anterior del cuerpo vertebral se aplasta: es una *fractura por aplastamiento*.

8. Las divisiones funcionales del raquis.

En una vista lateral del raquis pueden distinguirse fácilmente las diferentes divisiones funcionales. Por delante, se sitúa el *pilar anterior*, que desempeña diferentes divisiones funcionales. Este pilar tiene un papel estático. Por detrás, el *pilar posterior*, en el que se sitúan las *columnillas* de la apófisis articulares apoyadas en el arco posterior. Este otro pilar tiene un papel dinámico.

En sentido vertical, podemos distinguir, un *segmento pasivo* constituido por la vértebra misma, y un *segmento motor* que comprende de delante a atrás: el disco intervertebral, el orificio de conjunción, las articulaciones interapofisarias y el ligamento amarillo e interespinoso.

Existe una *relación funcional entre el pilar anterior y el posterior* que esta asegurado por los pedículos vertebrales. Cada vértebra ejerce un sistema de palanca, el cual permite amortiguar las fuerzas de compresión axial sobre la columna vertebral: *amortiguamiento directo y pasivo* a nivel del disco intervertebral, *amortiguamiento indirecto y activo* a nivel de los músculos de los canales vertebrales, esto a través de las palancas que forma cada arco posterior. El amortiguamiento de estas fuerza es pues *a la vez*, activo y pasivo.

9. Los elementos de unión intervertebral.

Entre el Sacro y la base del cráneo, la columna vertebral intercala veinticuatro piezas móviles: la conexión entre estas piezas está asegurada por numerosos elementos fibroligamentosos.

En una sección horizontal y en una vista lateral pueden distinguirse estos elementos fibrosos y ligamentosos:

- *ligamento vertebral común anterior* que se extiende desde la base del cráneo hasta el sacro por la cara anterior de los cuerpo vertebrales.
- *ligamento vertebral común anterior* que se extiende por la cara anterior de los cuerpos vertebrales desde la apófisis basilar del occipital hasta el canal sacro.

Entre estos dos ligamentos de gran extensión, la unión de cada tramo está asegurada por el *disco intervertebral* que consta de dos partes: *anillo pulposo* (periferia) y el *núcleo pulposo* (centro).

Numerosos ligamentos *anexos al arco posterior* aseguran la unión entre dos arcos vertebrales adyacentes.

1-. El *ligamento amarillo*, muy denso y resistente, que se une a su homólogo en la línea media y se inserta por arriba en la cara profunda de la lámina vertebral de la vértebra supraadyacente y por abajo al borde superior de la lámina vertebral de la vértebra subyacente.

2-. El *ligamento interespinoso* prolongado por detrás por el *ligamento supraespinoso*. Este lig. supraespinoso está poco individualizado en el tramo lumbar; en cambio, es muy nítido en el tramo cervical.

3-. En cada extremo de cada apófisis transversa se inserta, a cada lado, el *ligamento intertransverso*.

4-. A nivel de las articulaciones interapofisarias existen poderosos *ligamentos interapofisarias* que refuerzan la cápsula de estas articulaciones: *lig. anterior* y *lig. posterior*.

10. El nucleus asimilado a una rótula.

El nucleus pulposus tiene una forma parecida a una esfera que se comporta como una bola intercalada entre dos planos. Este tipo de articulación recibe el nombre de "rótula" y permite 3 clases de movimientos:

- a) **Movimientos de rotación** de una de las caras en relación a la otra.
- b) **Movimientos de deslizamiento** o también de cizallamiento de una cara sobre la otra a través de la esfera.
- c) **Movimientos de inclinación:**
 - Plano sagital: flexión-extensión
 - Plano frontal: inflexión lateral

En suma, este tipo de articulación permite 6 grados de libertad de movimientos: flexión-extensión, inclinación a cada lado, deslizamiento sagital, deslizamiento transversal, rotación derecha y rotación izquierda.

El estado de precompresión del disco y la autoestabilidad de la articulación discovertebral

Las presiones ejercidas sobre el disco intervertebral son considerables, y esto tanto más cuanto más nos aproximemos al sacro.

El nucleus soporta, por tanto, el 75% de la carga y el annulus el 25%.

Sin embargo el nucleus actúa como repartidor de presión en sentido horizontal sobre el annulus. La presión en el centro del nucleus no es nula, incluso cuando el disco

no soporta carga alguna. Esta presión es debida al estado de hidrofilia, que le hace hincharse en su albergue inextensible. Con ello nos hallamos ante un estado de ``pre-tensión``.

La pre-tensión a nivel del disco intervertebral permite a éste resistir mejor a las fuerzas de compresión y de inflexión. Cuando con la edad, el nucleus pierde sus propiedades hidrofílicas, su presión interna decrece y el estado de pre-tensión tiende a desaparecer, lo cual explica la pérdida del raquis senil.

Cuando un disco es solicitado por una **presión axial asimétrica** se produce un mecanismo de autoestabilidad que está ligado al estado de pretensión. Vemos así que el annulus y el nucleus forman juntos un par funcional. Si la presión interna del nucleus disminuye o si la capacidad de contención del annulus desaparece, este par funcional pierde su eficacia.

El estado de pre-tensión explica también las relaciones elásticas del disco.

11. La migración de agua en el nucleus.

El nucleus reposa sobre la parte central de la cara vertebral. Cuando se ejerce una presión importante como es el *peso del cuerpo en posición erecta*, el agua contenida en la sustancia gelatinosa del nucleus pasa a través de los orificios de la carilla vertebral hacia el centro de los cuerpos vertebrales. Esta presión estática se mantiene durante el día; a últimas horas de la noche, el nucleus está claramente menos hidratado que al comenzar la mañana.

De ello se deduce que el espesor del disco ha disminuido sensiblemente. En un sujeto normal esta pérdida de espesor acumulado en la altura total del raquis puede alcanzar los 2cm.

De forma inversa por la noche, *en decúbito dorsal*, los cuerpos vertebrales no sufren ya la presión axial debido a la gravedad. En este momento la hidrofilia del nucleus atrae el agua que vuelve a él desde los cuerpos vertebrales.

12. Fuerzas de compresión sobre el disco.

Las fuerzas de compresión sobre el disco son tanto mas importante a medida que nos aproximamos al sacro. Se estima que a la altura del disco L5-S1 el raquis soporta casi la mitad del peso del cuerpo. A ello se añade el tono de los músculos paravertebrales necesarios para mantener la estática y la erección del tronco. Los discos mas inferiores del raquis lumbar están sometidos a fuerzas que a veces sobrepasan su resistencia, en especial en personas de tercera edad.

La disminución de la altura del disco no es la misma según el disco esté sano o lesionado; siendo menor en el disco sano y mayor en el lesionado afectando también en su capacidad de recuperación.

Este aplastamiento progresivo del disco lesionado no deja de repercutir en las articulaciones interpofisarias; si el espesor del disco es normal, estas relaciones serán normales; y si no lo es estas relaciones se alteran y pueden ser causantes de artrosis.-

Variaciones del disco según el tramo:

↑ Espesor

Cervical: 3mm dorsal: 5mm lumbar: 9mm

↑ Relación disco-altura del cuerpo vertebral

Cervical: 2/5 dorsal: 1/5 lumbar: 1/3

Esta proporción da perfecta idea de la movilidad del segmento raquídeo, puesto que se comprueba que cuanto mayor es aquella más importante es ésta.

13. Comportamiento del disco intervertebral en los movimientos elementales.

Antes de todo esfuerzo existe una tensión previa de las fibras de annulus, bajo la presión del nucleus, lo cual define el estado de pre-tensión.

En suma podríamos decir que cualquiera que sea la compresión impuesta al disco; ya sea simétrica como la elongación o compresión axial o asimétrica como flexión, extensión, inflexión lateral y rotaciones; ésta se traduce siempre por un incremento de la presión interna del nucleus y un aumento de la tensión de las fibras del annulus.

14. Rotación automática del raquis durante la inflexión lateral

Cuando el raquis se desvía lateralmente, los cuerpos vertebrales giran sobre sí mismos de modo que su línea medio anterior se desplaza hacia la convexidad de la curvatura.

¿ Como explicar esta rotación automática de los cuerpos vertebrales? Esencialmente por dos mecanismos: **la compresión de los discos** y el grado de **tensión de los ligamentos**.

La inflexión lateral incrementa la presión en el disco del lado de la concavidad y se puede apreciar una rotación de los cuerpos vertebrales hacia el lado opuesto de la inflexión, debido a que la sustancia comprimida del disco tiende a escaparse por el lado más abierto.

Por un mecanismo inverso, los ligamentos de la convexidad puestos en tensión por la inflexión lateral tienden a desplazarse hacia la línea media en busca del camino más corto.

↑ *Amplitudes globales de la flexión-extensión del raquis:*

A nivel lumbar:	flexión: 60°	extensión: 30°
Dorsolumbar:	flexión: 105°	extensión: 60°
Cervical:	flexión: 40°	extensión: 75°
	flex. Total: 145°	ext.total: 140°

↑ *Amplitudes globales de inflexión lateral*

Cervical: 35-45° **dorsal:** 20° **lumbar:** 20°

Inclinación total: 75-85°

↑ *Amplitudes globales de rotación*

Cervical: 50° **dorsal:** 35° **lumbar:** 5°

Rotación total: 90-95°

BIBLIOGRAFÍA

1. KAPANDJI, I. A. *Cuadernos de fisiología articular: esquemas comentados de mecánica articular*. Barcelona. Masson. 1991.
2. PLAS, F. *La marcha humana: cinesiología dinámica, biomecánica y patomecánica*. Barcelona. Masson. 1984.
3. HAY, J. *Biomechanique des techniques sportives*. Prentice Hall. 1978.
4. AGUADO JODAR, X. *Eficacia y técnica deportiva: análisis del movimiento deportivo humano*. Barcelona. Inde. 1993.

