

ANATOMÍA FUNCIONAL DEL PIE (BIOMORFOLOGÍA Y BIOMECÁNICA)

L. F. LLANOS ALCÁZAR
M. FERNÁNDEZ FAIRÉN
M. NÚÑEZ-SAMPER PIZARROSO

Resumen

Los autores describen pormenorizadamente la anatomía del pie no sólo desde el punto de vista estático sino también dinámico.

Seguidamente analizan los diversos ejes y tipos de movimientos, así como las distintas fases de la marcha.

BIOMORFOLOGÍA

El tobillo y el pie forman una unidad funcional conforme con las investigaciones ontogénicas, mecánicas y fisiopatológicas. Dicha unidad funcional se constituye en una agrupación de elementos o unidades articulares que, englobadas en el «complejo articular periastragalino», va a incluir las articulaciones tibioperoneoastragalina, subastragalina y mediotarsiana.

Dicho complejo articular será el responsable del reparto de las cargas corporales a través de las distintas unidades articulares. Por otra parte, la musculatura larga del pie será la encargada de movilizar específicamente estas unidades, correspondiéndose sucesivamente la secuencia cinética con la flexoextensión a nivel de la articulación tibioperoneoastragalina

(ATPA), inversión-eversión y listesis en la subastragalina y con la rotación en pronación o supinación de la mediotarsiana.

Este esquema cinemático simplificado, que debe ser complementado con los aspectos cinéticos del apoyo y la marcha, se basa en la existencia de una serie de estructuras funcionales (pie y tobillo, talón, bóveda plantar, eminencia digito-plantar, etc.) y subestructuras mecánicas (configuración y orientación de las carillas articulares, disposición y distribución de la cortical y esponjosa de los huesos, sistemas de retención o estabilización osteoarticulares, etc.).

El comportamiento cinemático de este sistema funcional se manifiesta por unos movimientos, básicamente rotatorios, alrededor de unos ejes empíricos, respecto del propio pie o tobillo o bien respecto del plano medio sagital (además de los ejes dinámicos de progresión de la marcha). Dichos movimientos serán en su caso activos o adjuntos, o bien, en su mayoría, de rotación conjunta, oblicuos o pasivos.

Definiciones y conceptos

Pie: parte más distal del cuerpo humano que sirve de soporte esencial para la

posición humana de ortostatismo. Según define VILADOT, se trata de una estructura tridimensional variable, base del servomecanismo antigravitatorio, que constituye una pieza fundamental para la posición bipodal y la marcha humana.

Tobillo: región del miembro inferior que corresponde topográficamente a la articulación entre la pierna y el pie, de la que constituye su componente proximal. Es imprescindible para realizar las funciones definidas en el pie.

Talón: región posterior y plantar del pie. Conformada básicamente a expensas del calcáneo, informa de la orientación espacial del pie con respecto a la pierna. Junto con la bóveda plantar constituye la parte más característica del pie humano.

Bóveda plantar: excavación tarsometatarsiana o concavidad plantar. Se define en el *pie en descarga* por sus coordenadas morfológicas y dinámicas de referencia, y en el *pie apoyado* por la adaptación plástica de sus componentes arquitecturales a las sollicitaciones mecánicas estáticas y dinámicas corporales activas y pasivas.

Mecánicamente se constituye en un sistema funcional viscoelástico merced a sus componentes músculo-tendinoso y dermo-aponeurótico, que, adaptándose a las cargas externas (fuerzas) e internas (estrés), reaccionará frente a ellas para recuperar su disposición arquitectural. Además, se constituye en un sistema funcional osteo-ligamentario que, agrupado en diferentes unidades articulares, le va a conferir su rigidez necesaria para soportar las sollicitaciones mecánicas.

Empeine: Parte dorsal del pie que se corresponde con la zona de transición entre la región mediotarsiana y astragalina. Es más pronunciada en los pies cayos.

Arco transverso: Arco de concavidad plantar formado en el plano frontal por los cinco metatarsianos, en el pie en descarga. Merced a la capacidad de abducción-adducción y flexión-extensión de los metatarsianos primero, cuarto y quinto, este arco puede exagerarse, suprimirse o

incluso invertirse. Con el pie en carga, desaparece, apoyando los cinco metatarsianos.

Es producido y mantenido por la tensión y contracción de los ligamentos y músculos plantares (ver más adelante).

Eminencia digitoplantar: Región anterior de la planta del pie que, con el pie péndulo, resalta en forma de abultamiento alargado transversal, correspondiéndose con la zona de apoyo de las cabezas metatarsales (ver párrafo anterior). Es más pronunciada en pies afectos por procesos patológicos que favorezcan la atrofia de la musculatura plantar y la desestructuración de la arquitectura del pie, con desalineamiento metatarsal y la correspondiente sobrecarga de unos metatarsianos respecto de otros (ver alineamiento metatarsal).

Topografía del pie

Maléolo interno o tibial (*malleolus medialis*): Prolongación espesa y aplanada que se destaca de la extremidad tibial distal. Consta de dos partes: una externa, el *pilón*, gruesa y fuerte, más o menos cuboidea, y otra porción interna, triangular, corta, aplastada transversalmente, y como destacada del pilón, que se denomina *maléolo*.

Maléolo externo o peroneal (*malleolus lateralis*): Prolongación distal de la extremidad distal del peroné, palpable al igual que el maléolo tibial, más robusto que éste y también más prominente hacia el plano distal.

Tubérculos interno y externo de la cara inferior del calcáneo (*processus medialis et lateralis tuberis calcanei*): Corresponden a los verdaderos puntos de apoyo del calcáneo. Sirven de inserción a los ms. abductor del primer dedo, separador del quinto, flexor corto plantar y aponeurosis plantar.

Sustentaculum talare calcanei o apófisis medial del calcáneo: Apófisis dispuesta a modo de voladizo en la cara

interna del calcáneo, que hace más pronunciada la concavidad de la misma, contribuyendo así a formar el *canal calcáneo* por el que discurren todos los elementos retromaleolares internos en su paso hacia la planta del pie. Dicho canal se transforma en conducto merced a la aposición del m. separador del dedo gordo.

Tubérculo externo del calcáneo o cresta de los peroneos: Situado en la cara externa del calcáneo, separa dos surcos, uno superior o del tendón del m. peroneo lateral corto, y otro inferior, del m. peroneo lateral largo.

Tuberosidad posterior del calcáneo: Corresponde al límite posterior de la gran tuberosidad calcánea. Es la cara posterior.

Tubérculo del escafoides (*tuberositas ossis navicularis*): Prominencia del extremo interno del escafoides, palpable a través de las partes blandas, que sirve para la inserción del tendón del m. tibial posterior.

Tubérculo del cuboides: Muchas veces palpable, en la cara externa del hueso. Limita posteriormente el principio del surco o canal del cuboides.

Arcos transversos del pie

Definición: Excavación morfológica evidente de la bóveda plantar en sentido transversal al eje longitudinal del pie, cuya forma recuerda a dos troncos de cono unidos por sus bases menores, y en la que se distinguen:

- a) Un *arco posterior* formado por la parte anterior del ensamblaje de las tres cuñas y el cuboides y por la parte proximal de las bases de los metatarsianos.
- b) Un *arco anterior* de flecha más corta constituido por las cabezas de los cinco metatarsianos.

BIOMECÁNICA

a) El arco transverso posterior integrante del tronco de cono posterior, mecánicamente estático contribuye a configurar y transmitir los vectores de fuerza a los cinco radios, siendo zona de encrucijada entre el pie astragalino y el pie calcáneo. Su morfología va a condicionar la correcta dirección y alineación de los metatarsianos; sirve de protección y cobertura a los músculos flexor corto plantar, cuadrado plantar de Sylvio, flexor largo del dedo gordo, vasos y nervios plantares y zona de tránsito de estructuras tendinosas extrínsecas del pie, así como ligamentos y fascias.

b) El arco transverso anterior integrante del tronco de cono anterior, dinámico, interviene a modo de ballesta semielíptica en las regulaciones de las presiones que se transmiten posteriormente al suelo.

Con el pie péndulo mantiene su arquitectura normal.

Con el pie en apoyo su altura va a disminuir hasta hacer apoyar todas las cabezas metatarsales en el suelo, en virtud de la elevación del primero y quinto metatarsianos para recobrar su forma primitiva al desaparecer el peso corporal y en virtud de su elasticidad, y del comportamiento de la musculatura intrínseca.

En situación bipodal estática la distribución de las cargas que reciben las cabezas metatarsales es igual para todas.

Dinámicamente la situación cambia; en el momento del pasó de apoyo a carga, se liberan de peso las cabezas de los metatarsianos segundo a quinto, pasando esta al primer metatarsiano que se aplica con fuerza al suelo para iniciarse la fase de despegue de los dedos.

Las estructuras pasivas, que mantienen esta unidad anatomofuncional, serían el anclaje de las articulaciones proximales intermetatarsianas con el tarso y las estructuras ligamentosas, en las que cabe destacar el ligamento transverso metatarsiano y el de Lisfranc.

Las estructuras activas vendrían conformadas por las terminaciones tendinosas del tibial posterior, peroneo lateral largo, los interóseos y la porción transversa del adductor del dedo gordo.

Planos cardinales corporales

Plano frontal: plano perpendicular al plano horizontal de sustentación, que corta el cuerpo en sentido latero-lateral. Equivalente a plano coronal.

Plano sagital: plano perpendicular al plano horizontal de sustentación, que corta el cuerpo en sentido antero-posterior.

Plano horizontal: plano paralelo al plano horizontal de sustentación, que corta al cuerpo horizontalmente. Equivalente a plano transversal o transversal.

Sistema ortogonal de ejes corporales

Eje sagital: eje dirigido en sentido latero-lateral, comprendido en la intersección de los planos frontal y horizontal, y perpendicular al plano sagital. Equivalente a eje transversal o transversal.

Eje antero-posterior: eje dirigido en sentido antero-posterior, comprendido en la intersección de los planos sagital y horizontal, y perpendicular al plano frontal. Equivalente a eje frontal.

Eje vertical: intersección de los planos frontal y sagital, y perpendicular al plano horizontal o transversal.

Conceptos de anatomía funcional

Segmento: Conjunto formado por un metatarsiano y su dedo correspondiente. La prolongación al elemento de la segunda fila del tarso correspondiente se denominará **radio**.

Primer radio: Unidad funcional formada por la primera cuña y el primer metatarsiano.

Segundo radio: Unidad funcional formada por la segunda cuña y el segundo metatarsiano.

Tercer radio: Unidad funcional formada por la tercera cuña y el tercer metatarsiano.

Cuarto radio: Formado por el cuarto metatarsiano.

Quinto radio: Formado por el quinto metatarsiano.

Eje longitudinal del pie: 1) Eje que pasa por el centro del astrágalo y el borde externo del segundo metatarsiano. Corresponde con el eje de carga del pie en apoyo estático (Ejemplo: Abductor del dedo gordo - Separador). 2) Pasa por el centro del plano medio de apoyo corporal (sagital), Permite definir los movimientos del pie respecto del contralateral y del resto del cuerpo humano.

Eje vertical de carga: Sigue el eje longitudinal de la tibia, pasa por el centro del astrágalo y es ligeramente medial al plano sagital bisector del calcáneo. Así se produce un discreto efecto de pronación del talón que es fácilmente neutralizado por la fuerza supinadora generada fundamentalmente por el músculo tibial posterior.

Ejes de movimiento de las articulaciones del pie

Eje de la articulación tibioperoneo astragalina: Dirigido oblicuamente de lateral, plantar y posterior, a medial, dorsal y anterior, con una inclinación de $8^\circ \pm 4^\circ$ respecto al plano horizontal, y de $84^\circ \pm 7^\circ$ respecto al plano sagital.

Tiene tres componentes vectoriales: a) Transverso principal, alrededor del cual se produce el movimiento de flexión-extensión; b) longitudinal (menor), alrededor del cual se produce el movimiento

de pronosupinación en el plano transverso, y el de abducción-adducción, en el plano frontal.

Eje de la articulación subastragalina: Dirigido oblicuamente de lateral plantar y posterior a medial, dorsal y anterior, con una inclinación de 42° respecto al plano horizontal, y de 16° respecto al plano sagital.

Ejes de la articulación mediotarsiana: Son dos, uno oblicuo y otro longitudinal, dirigidos ambos oblicuamente de lateral, plantar y posterior a medial, dorsal y anterior.

El eje oblicuo o de *flexo-extensión* tiene una inclinación de 52° respecto al plano horizontal, y de 57° respecto al plano sagital.

El eje longitudinal (*de rotación*), tiene una inclinación de 15° respecto al plano horizontal, y de 9° respecto al plano sagital.

Para MANN e INMAN la flexo-extensión a este nivel viene definida por dos ejes paralelos en el plano frontal, uno superior, que pasa por el cuello astragalino, y otro, inferior, que lo hace por el cuerpo del calcáneo:

-Con el pie en *eversión* (con tendencia a la pronación o aplanamiento) los dos ejes están alineados en paralelo.

-Con los dos ejes cruzados (*inversión*) y arcos plantares elevados o pie supinado, existe una restricción del movimiento de flexo-extensión del pie anterior con el medio.

Barra o eje metatarsal: Forma 50° a 70° con el eje medio del pie.

Eje del primer radio: Dirigido de lateral, plantar y anterior, al medial, dorsal y posterior con una inclinación de 5° respecto al plano horizontal, y de 45° respecto al plano sagital.

Eje del quinto radio: Dirigido de lateral, plantar y posterior a medial, dorsal y anterior, con una inclinación de 20° respecto al plano horizontal, y de 35° respecto al plano sagital.

Línea del talón: Se corresponde con la posición del calcáneo en el plano frontal. Su desviación respecto de la línea de la pierna (o de HELBING) define la alineación en valgo o varo del mismo.

Movimientos del pie (*)

Flexión-extensión: Movimiento en el plano sagital. El extremo distal del segmento considerado se dirige plantarmente en la flexión, y dorsalmente en la extensión.

Inversión-eversión: Movimiento complejo tridimensional en el que intervienen la articulación del tobillo, la subastragalina, la articulación de Chopart y la de Lisfranc. Se compone de movimientos más simples que se realizan conjuntamente (flexo-extensión, pronosupinación y abducción-adducción). Durante la inversión, la planta del pie se orienta hacia abajo y adentro, y, durante la eversión, lo hace hacia arriba y afuera.

Abducción-adducción: Movimiento en el plano horizontal. El extremo distal del segmento considerado se dirige interna o medialmente en la adducción, y externa o lateralmente, en la abducción.

Supinación-pronación: Movimiento complejo según un eje oblicuo respecto a los planos cardinales, y con cierto grado de movimiento en cada uno de ellos.

La supinación combina flexión, inversión y adducción.

La pronación combina extensión, eversión y abducción.

(*) Se refieren los movimientos al plano en que suceden principalmente; esto no significa que se trate de movimientos simples, sino que resultan ser la resultante de una combinación compleja en el sentido cinemático (así p.ej., durante la inversión, parte del movimiento se desarrolla en el plano frontal, pero otra, no).

Estos componentes cinemáticos variarán según el pie se encuentre fijo o apoyado, o bien en descarga o libre.

Varo y valgo: Posiciones de rotación respecto del eje del miembro inferior.

Rotación conjunta del miembro inferior: Los movimientos del miembro inferior, son en la práctica de tipo rotatorio respecto de los ejes mecánicos. Esta rotación es adjunta o bien, como suele suceder, conjunta o masiva.

Posición de máxima estabilidad articular: o «close-pack-position». Se produce durante la extensión. La estabilidad lateromedial se define por la posición de los maleolos, en tanto que en el plano sagital será ligamento dependiente.

Marcha

Paso: Unidad funcional de la marcha comprendida entre dos apoyos sucesivos del mismo pie.

Corresponde al «gait» inglés.

Fases del paso: Fase de apoyo y fase oscilante.

a) *Fase de apoyo:* Comprende desde que el pie contacta con el suelo por el talón, hasta el despegue de los dedos. Al comienzo de esta fase el apoyo es bipodal, pasa a ser monopodal al despegar el pie contralateral, y finaliza con un nuevo apoyo bipodal al contactar el talón de dicho pie de nuevo.

Partes de la fase de apoyo (Nomenclatura antigua):

1. Contacto de talón.
2. Apoyo plantar.
3. Fase media del apoyo.
4. Despegue del talón.
5. Impulso de despegue.
6. Despegue de los dedos.

Partes de la fase de apoyo (nomenclatura moderna):

1. Contacto inicial.
2. Respuesta a la carga.
3. Fase media del apoyo.
4. Fase terminal del apoyo.
5. Preoscilación.

b) *Fase oscilante:* Comprende desde que el pie despega del suelo por los dedos hasta que vuelve a contactar con el mismo por el talón.

Partes de la fase oscilante (nomenclatura antigua):

1. Aceleración.
2. Fase media de la oscilación.
3. Deceleración.

Partes de la fase oscilante (nomenclatura moderna):

1. Fase inicial de la oscilación.
2. Fase media de la oscilación.
3. Fase terminal de la oscilación.

Durante la fase de oscilación, el pie aparece en ligera posición de varo (supinación), en tanto que durante la fase de apoyo posterior gira a la posición de valgo (pronación).

Abertura del paso: Ángulo que forma el eje longitudinal estático del pie con la línea de progresión del cuerpo. Aproximadamente es de 15°.

Longitud de paso: Distancia entre dos apoyos sucesivos de un pie. Entre 0,7 y 0,9 metros.

Corresponde al «step length» inglés.

Cadencia: Número de pasos por minuto. Entre 90 y 120.

Tiempo de apoyo monopodal: Tiempo que dura el apoyo sobre un solo pie y que corresponde a la parte media de la fase de apoyo de un paso. Dura entre 0,5 y 2 segundos. Es un parámetro importante del paso por su particular sensibilidad a las anomalías del mismo.

Eje dinámico del pie: Línea resultante de las presiones registradas sobre la planta del pie a lo largo de un paso. Partiendo del borde externo del talón, sigue el borde interno del tercer metatarsiano, y hace un bucle hacia adentro pasando entre el segundo y el primer dedo.

— BIBLIOGRAFÍA (Biomorfología del pie) —

1. BLAUVELT, C. T. y NELSON, F. R. T.: *A Manual of Orthopaedic Terminology*. (3ª. edic. The C. V. Mosby Comp. St. Louis (1985) (Pp. 185-196) y (228-233).
2. FENEIS, H.: *Nomenclatura anatómica ilustrada*. Ed. Salvat, Barcelona (1983).
3. FRANKEL, V. H. y NORDIN, M.: *Basic Biomechanics of the Skeletal System*. Lea Febiger. Philadelphia (1977).
4. HELAL, B y WILSON, D.: *The Foot*. Churchill Livingstone. London, (1988). (Pp. 75-201).
5. MANN, A. Roger.: *Surgery of Foot*. The C. V. Mosby Company. St. Louis (1986). Pp. 1-64).
6. McCONNAILL, M. A., BASMAJIAN, J. V.: *Muscles and Movement*. Krieger Publishing Company. New York (1977).
7. ORTS LLORCA, F.: *Anatomía Humana*. Tomo I. Ed. Científico-Médica. Madrid (1986).
8. VILADOT, A. y cols.: *Diez lecciones sobre patología del pie*. Ed. Toray, S.A. Barcelona (1979), (pp. 1-64).

— BIBLIOGRAFÍA (Arcos transversos del pie) —

1. JAHSS, M.: *Disorders of the Foot*. W. B. Saunders Co. (1982).
2. ORTS LLORCA, F.: *Anatomía Humana*. Tomo I. Ed. Científico Médica, (1984).
3. PÉREZ CASAS, A.: *Anatomía funcional del aparato locomotor*. Ed. Bailly Bailliere, S.A. (1965).
4. VALENTE, V.: *Ortesis del pie*. Ed. Panamericana (1979).
5. VILADOT, A.: *Patología del antepie*. Ed. Toray, S. A. (1984).