

PATOMECANICA DEL PIE

Luis Fernando LLANOS ALCAZAR*

RESUMEN

A partir de la definición de "estructuras funcionales" del tobillo y pie (talón, bóveda plantar y eminencia dígito-plantar), el autor desarrolla conceptos sobre patomecánica del pie.

RESUMÉ

Suivant la définition des "Structures fonctionnelles" de la Cheville et du Pied (Talon, voûte plantaire et complex digito plantaire), l'auteur traite de la pathomecanique du Pied.

SUMMARY

Based on the definition of "Functional structures" of the ankle and foot (Heel, Arches of the foot and the Boule), the author develops his concept about foot pathomecanic.

•

El pie es aquella parte más distal del cuerpo humano que sirve de soporte esencial para la posición de ortostatismo. Esta función de sustentación, propia de la especie humana, nos diferencia entre la familia de los mamíferos.

Se encuentra sometido a unas exigencias mecánicas extraordinarias. Su complejidad funcional se manifiesta en que, así como los diferentes órganos y aparatos del recién nacido actúan como tales (en mayor o menor intensidad) al nacer, la posición erecta, que califica nuestra especie, solamente se alcanza hacia los doce meses de vida. Es preciso, pues, que las estructuras del pie completen su desarrollo extrauterinamente.

Si comparamos el pie humano con el de los

primates, destaca el hecho de que, frente a la función eminentemente prensil de estos, el pie humano está adaptado esencialmente para soportar el peso corporal. Para ello se diferencian una serie de estructuras funcionales que, integradas en sistemas, conforme con el concepto de BENINNGHOFF, van a permitir al pie adaptarse a solicitudes mecánicas tan diversas como la simple bipedestación, el salto o la carrera.

¿Cuáles son dichas estructuras funcionales? Según nuestro concepto, el tobillo, talón, bóveda plantar y eminencia dígito-plantar.

Sin entrar en una descripción pormenorizada de la anatomía y biomecánica de tales estructuras, que rebasaría el propósito de este trabajo, las revisaremos brevemente desde un punto de vista conceptual, pues su conocimiento es necesario para comprender la patología del pie más allá de las simples alteraciones morfológicas.

I- TOBILLO

El tobillo y el pie constituyen una unidad morfológica, funcional y clínica que es preciso considerar integrada en la cadena cinemática del miembro inferior, de la que constituyen su eslabón distal.

Topográficamente, el tobillo es la región del miembro inferior que se corresponde con la articulación entre los huesos de la pierna y el pie. Es imprescindible para realizar las funciones definidas en el pie.

Su estudio excede de la simple comprensión de la anatomía y fisiología de la articulación tibioperoneoastragalina (ATPA), debiendo encuadrarse en una superestructura funcional más amplia: el **complejo articular periastragalino**, constituido, además de por la citada articulación, por la subastragalina y la mediotarsiana.

La denominada mortaja tibioperoneal se mantiene básicamente por la configuración articular, los sistemas ligamentarios medial y lateral, la cápsula articular y los ligamentos interóseos. En resumen, su estabilidad -al igual que en el caso de

* Prof. Titular Ciencias Morfológicas. U.C.M.

la articulación de la cadera- es inherente a su diseño morfológico.

La configuración articular se basa en la existencia de una articulación en tróclea o polea que, se verá reforzada por un sistema de contención ósea y de retención cápsulo-ligamentoso, con objeto de impedir los movimientos de varo y valgo del astrágalo dentro de la mortaja tibioperoneal. De la integridad de los ligamentos lateral, deltoideo y de la sindesmosis inferior tibioperoneal, dependerá la estabilidad articular.

La máxima superficie de contacto ósea se produce durante la extensión (flexión dorsal), coincidiendo con la denominada "close-pack-position". La estabilidad látero-medial va a venir definida por los maleolos y sus ligamentos, en tanto que en el plano sagital va a ser ligamento-dependiente. Posteroexterna y póstero-internamente, los tendones peroneos, del tibial posterior, flexor largo de los dedos, flexor propio del dedo gordo y sus vainas, contribuirán así mismo a estabilizar el sistema.

En conjunto, los **ligamentos peroneo-tibiales** parecen desempeñar un papel dominante en el control de la estabilidad rotatoria y sagital del tobillo. Por su parte el **ligamento deltoideo**, al igual que sucede con la membrana interósea, va a colaborar en el mantenimiento de la estabilidad transversal del tobillo.

Los traumatismos que actúen mediante fuerzas extensoras sobre el tobillo, afectarán principalmente al ligamento lateral interno, en tanto que aquellas que lo hagan en flexión plantar, lesionarán preferentemente el externo. Las fuerzas rotacionales internas actuarán fundamentalmente sobre los fascículos peroneo-astragalino anterior y posterior, en tanto que las externas lo harán sobre la porción profunda del ligamento deltoideo, que puede romperse antes que el superficial. Las fuerzas aductorales lesionarán primeramente el ligamento peroneo-calcáneo, en tanto que las que actúen en abducción producirán la rotura de las fibras superficiales del ligamento deltoideo, permaneciendo indemnes las profundas.

Por último, la **sindesmosis peroneo-tibial distal** colaborará en el mantenimiento de la estabilidad rotacional y de los movimientos de cajón anterior y posterior.

Como indica VILADOT, el astrágalo y el calcáneo separados de la pinza maleolar y de sus conexiones músculo-ligamentosas, se derrumbaría en valgo y equino; por ello existen unos **sistemas específicos** que mantienen en posición el tarso posterior en sentido frontal y sagital.

En el plano frontal la estabilidad se relaciona básicamente con el marco osteoligamentario de la ATPA, al que añadiremos los tendones retromaleolares; se trata no solo de un sistema estabilizador sino también de carga. El sistema longitudinal, se basa especialmente en la existencia de la unidad morfofuncional constituida por el "**sistema aquileo-calcáneo-plantar**" que, descrito por VILADOT y ARANDES, está integrado por el tendón de Aquiles, sistema trabecular posteroinferior del calcáneo y parte de los músculos cortos del pie, especialmente el flexor corto plantar y el abductor del dedo gordo como hemos tenido ocasión de comprobar por medios electromiográficos, tanto en pies normalmente configurados como en bóvedas aplanadas.

TABLA 1. *Análisis comparativo cuantitativo de la actividad de la musculatura plantar por medio del electromiograma: (1) Estudio sobre ambos pies; (2) Estudio sobre un solo pie (posición de "sobrecarga funcional").*

<i>Actividad muscular obtenida</i>			
	1 P.	2 P.	T.
Pie normal			
1) a.b.g.	7,0 %	24,2 %	31,2 %
2) f.c.p.	5,9 %	15,0 %	20,92%
3) t. ant.	8,2 %	11,4 %	19,67%
4) t. post.	2,35%	11,47%	13,82%
5) ab. 5°	1,76%	10,88%	12,64%
6) p.l.l.	1,76%	9,70%	11,46%
Pie plano			
1) a.b.g.	6,76%	29,4 %	36,17%
2) p.l.l.	6,76%	23,52%	30,28%
3) t. post.	5,29%	22,00%	27,29%
4) f.c.p.	4,7 %	14,7 %	19,40%
5) t. ant.	2,3 %	17,05%	19,35%
6) ab. 5°	2,94%	10,5 %	13,52%
Pie cavo			
1) a.b.g.	6,17%	24,11%	30,28%
2) p.l.l.	10,00%	17,64%	27,64%
3) t. post.	5,88%	16,47%	22,35%
4) f.c.p.	5,88%	13,25%	19,13%
5) t. ant.	3,60%	11,91%	15,51%
6) ab. 5°	0,75%	8,87%	9,62%

II-PIE

Conforme con la definición de A. VILADOT, es "una estructura tridimensional variable, base del servomecanismo antigravitatorio, que constituye una pieza fundamental para la posición bipodal y la marcha humana".

Es preciso definir el pie en carga y descarga para poder explicar mejor sus cambios de forma y adaptación. Las fuerzas desarrolladas en el cuerpo humano se transmiten por el pie al suelo; por otra parte la estructura del pie requiere suficiente elasticidad para acomodarse a los cambios de orientación de las superficies de carga y a sus irregularidades.

Como expresamos inicialmente, una serie de estructuras funcionales van a permitir al pie satisfacer estas demandas.

A) 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 y, junto con la bóveda plantar, constituye la parte más característica del pie humano.

La 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 del mismo y los desplazamientos laterales, en varo o valgo.

El talón delimita tres grandes zonas topográficas por las que discurren estructuras vasculo-nerviosas y tendinosas procedentes de la pierna para animar y motorizar el pie. Estas son: la región interna o **canal tarsiano**, la externa o **canal peroneo** y la posterior o **calcáneo-aquileo-plantar media**.

Aunque incluida dentro del sistema funcional dermoaponeurótico (ver más adelante), la almohadilla plantar cumple un papel fundamental específicamente en el apoyo y reparto de fuerzas sobre el talón. Su mayor o menor grosor, así como la conservación de sus propiedades mecánicas, son signos del correcto apoyo plantar. Los métodos de medición de su espesor arrojan cifras medias de 21 mm. En algunas enfermedades aumenta, como es el caso de la acromegalia, en tanto que con la edad disminuye progresivamente.

Al igual que se describiera en el tobillo, y como prolongación de los sistemas de éste, existen unos elementos estabilizadores en el plano frontal que impiden la caída del talón en valgo al ejercer un tope o soporte a la excesiva pronación; estos elementos actúan a compresión y están representados por el maleolo peroneo y por el sustentaculum

tali. Así mismo otros actúan a distensión, limitando por tracción el movimiento de supinación: los ligamentos deltoideo, interóseos tibioperoneo y astrágalo-calcáneo de la subastragalina.

En el plano sagital, además del ligamento interóseo subastragalino, que impide el deslizamiento del astrágalo hacia delante del calcáneo (listesis), la estabilidad del talón se mantiene por medio del sistema **calcáneo-aquileo-plantar** ya descrito. Dicho sistema es definido por VILADOT como una *unidad funcional*, que sirve para colocar el pie en posición de puntillas, básica en la fase de despegue de la marcha normal y necesaria para movimientos tales como la carrera, el salto o la danza. Según el autor "las trabéculas posteriores del calcáneo, serían como un gran sesamoideo, una rótula, que transmitiría la potencia flexora del tríceps sural al antepie".

Para cumplir dicha función el sistema cuenta con el tendón de Aquiles, el más voluminoso y potente del cuerpo humano (5-6 cm. de largo, 12-15 mm. de ancho, 5-6 mm. de espesor). Ricamente innervado, se hallan en su interior husos neurotendinosos de GOLGI, que le dotan de un papel importante en los mecanismos de propiocepción del tobillo.

En resumen, el talón es una zona de transición mecánica entre la pierna y el antepie, dotada morfológicamente para el apoyo estático, y funcionalmente para la propulsión dinámica.

B) Bóveda plantar

Término con que se designa la excavación tarsometatarsina o concavidad plantar del pie.

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 solicitaciones mecánicas estáticas y dinámicas corporales activas y pasivas.

Mecánicamente se constituye en "**un sistema funcional viscoelástico merced a sus componentes músculo-tendinoso y dermoaponeurótico**". Dicho sistema, 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, va a dotar a la bóveda de la rigidez necesaria para soportar las solicitaciones mecánicas.

La aparición de la bóveda longitudinal, unida a la transversal (ver más adelante), da a la planta el

aspecto de semicúpula cóncava hacia abajo. Esta excavación constituye el carácter **más distintivo** del pie humano. Permite relacionar la forma de la planta con el plano horizontal a través del plano medio del primer radio, y clasificar los pies en cavos (con arco alto), normales y planos (con bóveda hundida); el pie convexo sería un caso particular del plano.

Morfológicamente su descripción se basa por lo tanto en la existencia de unos arcos óseos de diferente elevación respecto del suelo durante el apoyo, que aumentan de altura con el pie en descarga y disminuyen con el apoyo hasta llegar a desaparecer total o parcialmente. Este es el caso del mal llamado arco anterior o transverso.

Esta disposición se complementa con la existencia de una trabeculación o disposición espacial de la esponjosa de los diferentes huesos del pie "en mosaico" que, engloba por una parte el complejo articular periastragalino, y permite por otra parte, la conveniente transmisión de cargas estáticas y dinámicas a través de los diferentes haces trabeculares.

Como se ha indicado, para cumplir su función la bóveda plantar se estructura en un sistema funcional osteo-articular, músculo-tendinoso y visco-elástico, que revisamos brevemente.

a) Unidad funcional osteo-articular. La configuración de la bóveda plantar depende fundamentalmente de la disposición del esqueleto del pie, y en especial de la posición del calcáneo. Dicha disposición se basa en una construcción en mosaico agrupada en el "**complejo articular periastragalino**".

Desde el punto de vista cinemático, las articulaciones constituyentes de tal complejo van a producir una serie de movimientos respecto de los ejes articulares (1) que, a través de una secuencia cinética, se corresponderán sucesivamente con la flexo-extensión en la tibiotarsiana, inversión-eversión y listesis en la subastragalina, y rotación en pronación o supinación en la mediotarsiana. En resumen, **la musculatura del miembro va a impulsar un movimiento combinado helicoidal a nivel del pie que se traducirá en alteraciones de la configuración y apoyo de la bóveda plantar.**

(1) Dichos ejes serán oblicuos tanto en la ATPA como en la subastragalina y mediotarsiana, favoreciendo el desarrollo de movimientos "conjuntos" o rotatorios. (Figura 3).

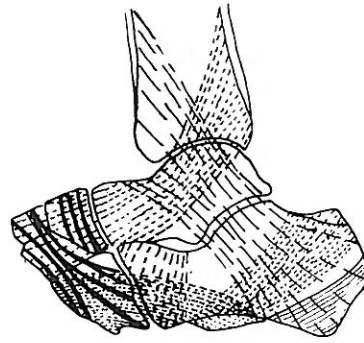


FIGURA 2. Principales haces trabeculares del pie.

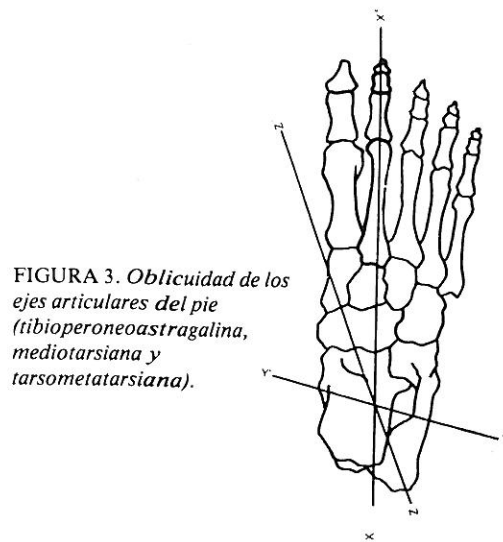


FIGURA 3. Oblicuidad de los ejes articulares del pie (tibio-peroneo-astragalina, medio-tarsiana y tarso-metatarsiana).

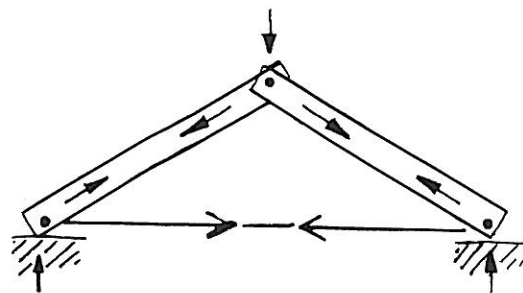


FIGURA 4. Acción de cercha de la aponeurosis y musculatura corta plantar en unión con el tendón de Aquiles y el mecanismo gleno-sesamoideo.

b) Unidad funcional músculo-tendinosa. La acción a modo de estribo de los músculos largos del pie, más la de los músculos cortos plantares y potentes ligamentos interóseos, contribuyen variablemente al mantenimiento de la bóveda plantar durante la carga. Los músculos interóseos, por su parte, actúan más sobre los dedos.

c) Unidad funcional dermo-aponeurótica. Representa, junto con la anterior, lo que denominamos el “**componente viscoelástico**” de la bóveda. Además de la gruesa almohadilla plantar, ya citada, añadiremos desde el calcáneo hasta el antepié, a modo de cercha, contribuyendo a mantener la superestructura. (Figura 4).

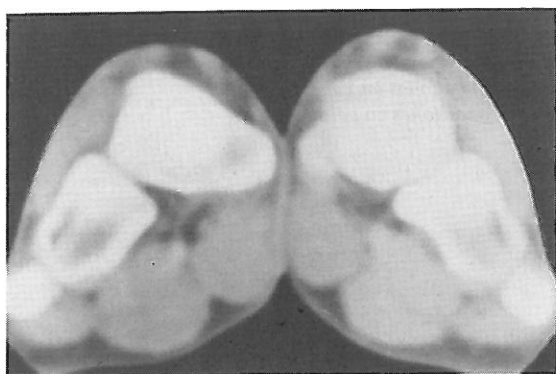
También incluimos en esta unidad la importante función vascular representada por las redes subaponeurótica, subdérmica, subepidérmica y perisudorípara con innumerables anastomosis, y cuyas particularidades confieren a esta región su individualidad, representada en la “bomba plantar” que, mediante la denominada plantilla venosa

plantar o plexo de LÉJARS, realiza durante la marcha la función de un verdadero corazón venoso periférico.

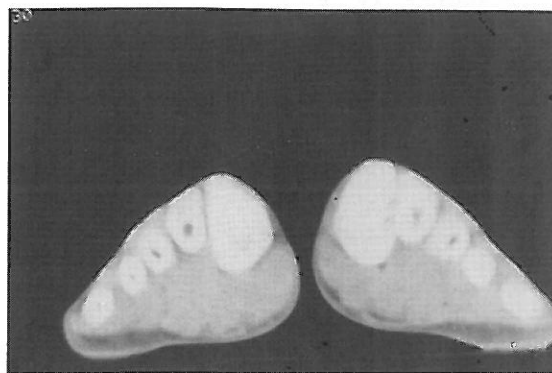
C) Eminencia dígito-plantar

Localizada en el antepié, topográficamente es una región que continúa la excavación plantar a partir de la línea articular tarsometatarsiana o de LISFRANC. Funcionalmente está unida a las estructuras descritas en párrafos anteriores, pues de la configuración y orientación espacial de aquellas dependerá su comportamiento en la estática y dinámica del pie.

Por ello, y con independencia de la existencia de unos arcos longitudinales (definidos por FICK), que corresponden a los diferentes haces trayectoriales o de carga transmitidos a los cinco radios del pie, es preciso considerar unos **arcos plantares transversos** al eje longitudinal del pie, cuya forma recuerda a dos troncos de cono unidos por sus bases menores. (Figuras 5a y 5b).



5a



5b

FIGURA 5. *Visión del arco plantar transversal proximal (5a) y distal (5b).*

En ellos distinguiremos: a) un *arco posterior*, formado por la parte anterior de la articulación entre las tres cuñas y el cuboide con las bases de los metatarsianos, y b) un *arco anterior*, de flecha más corta, constituido por las cabezas de los metatarsianos. Su altura varía debido a la oblicuidad de los ejes metatarsianos (desde 18° para el primero, hasta 5° para el quinto).

La morfología y orientación del arco posterior condicionará el correcto alineamiento de los metatarsianos. Mecánicamente se puede considerar un arco estático, transmisor de presiones, que presta-

rá cobertura a las partes blandas, y un arco anterior dinámico, elástico, regulador de presiones y bisagra en el despegue del pie durante la marcha.

Es preciso considerar estos arcos en reposo, en posición estática y en condiciones dinámicas. En reposo, por la acción de las fuerzas musculares, unida a la escasa movilidad de la paleta central (representada por el 2° al 4° metatarsianos), los metatarsianos 1° y 5° descienden por debajo de los componentes centrales. Es el falso “arco anterior” citado tantas veces en la literatura. (Figura 6a).

Con el pie en apoyo, la flecha del arco dismi-

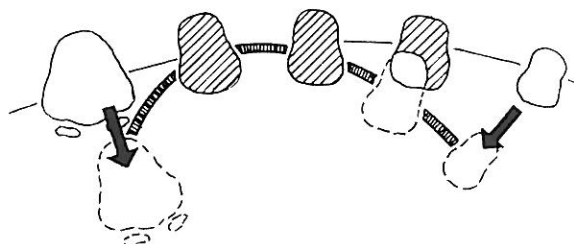
nuirá hasta hacer apoyar todas las cabezas de los metatarsianos sobre el suelo, en virtud de la elevación de las cabezas del 1° y 5°. (Figura 6b).

Finalmente, en la fase dinámica se van liberando progresivamente de carga las cabezas del 5° al 2° metatarsianos, pasando ésta al 1°, que se aplica fuertemente al suelo merced a la actuación

del aparato gleno-sesamoideo, para permitir que se inicie la fase de despegue de los dedos. Actuando en ese momento como bisagra facilitará la última fase de la marcha, de despegue o impulsión.

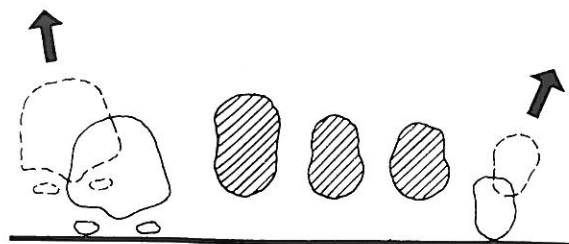
Otros aspectos cinemáticos y de estudio de cargas complementan los conceptos morfofuncionales que, resumidamente, hemos expuesto.

FIGURA 6. Variaciones del arco transverso distal del pie conforme pase de la posición de descarga a la de apoyo. (Ver texto).



DESCENSO DEL 1° y 5° ARCO EN REPOSO

6a) En descarga se produce un descenso de los arcos laterales respecto de la paleta central más rígida.



ELEVACION ESTATICA DEL 1° y 5°

6b) En carga o apoyo se produce un apoyo efectivo de todas las cabezas metatarsales en condiciones no patológicas.

BIBLIOGRAFIA

BENNINGHOFF, A. «Die Anatomie des Funktioneller Systeme». Morphol. Jahr., 65, 1-10, 1930.

BLAUVELT, C.T. y NELSON, F.R.T. «A Manual of Orthopaedic Terminology». (3ª edic.). The C.V. Mosby Comp. St. Louis, 185-196 y 228, 1985.

BRUCE, J. y WALMSLEY, R. «Some observations on the arches on the foot and flat foot». Lancet, 235, 656, 1938.

HICKS, J.H. «Biomechanical Studies of the musculo-skeletal system». En Evans, F.G., ed., Springfield, Charles C. Thomas 1961.

LLANOS ALCAZAR, L.F.: «La bóveda plantar». Rev. Esp. de Cir. Ost., 22, 128, 67, 1987.

MORTON, D.J.: «The human foot. Its evolution, physiology and functional disorders». Columbia University Press. New York, 1935.

MANN, A.R. «Surgery of the Foot». The C.V. Mosby Com-

pany. St. Louis. 1986.

NUÑEZ-SAMPER, M.: LLANOS ALCAZAR, L.F.: MARTIN GUINEA, J.: GOMEZ PELLICO, L. «Análisis funcional y estadístico de los sistemas estáticos de la bóveda plantar». Chir. del Pie, 8, 147, 1984.

SANMARCO, G.J. «Biomechanics of the foot». En Basic Biomechanics of the Skeletal System. Frankel, V.H. y Nordin, M.

SARRAFIAN, S.K. «Anatomy of the Foot and Ankle». J.B. Lippincott Company. Philadelphia, 1983.

VILADOT PERICÉ, A. y cols. «Quince lecciones sobre patología del pie». Ediciones Toray, S.A., Barcelona, 1989.

SUZUKI, N. «An electromyographic study of the role of muscles in arch support of the normal and flat foot. Nagoya. Med. J., 17, 57, 1972.