



Anatomía funcional, biomecánica y patomecánica de la estabilidad del tobillo

Manuel Monteagudo, Pilar Martínez de Albornoz,
Ernesto Maceira y Borja Gutiérrez

*Unidad de Cirugía de Pie y Tobillo, Cirugía Ortopédica y Traumatología,
Hospital Universitario Quirón Madrid
Facultad de Medicina, Universidad Europea, Madrid*

INTRODUCCIÓN

El complejo funcional del tobillo y del pie es evidentemente complejo. La importancia del conocimiento de la estructura y la función del tobillo es evidente si pensamos que la urgencia traumatológica hospitalaria más frecuente es la entorsis o esguince de tobillo. Algunos esguinces graves y algunas fracturas pueden ocasionar o favorecer la pérdida de la estabilidad tibioperoneoastragalina.

El control de la estabilidad anatómica del tobillo viene inherentemente condicionado por su estructura ósea y ligamentosa. Pero las variantes en la posición de la pierna —primarias o secundarias— (como una tibia vara) o en la posición del pie —primarias o secundarias— (como un pie plano secundario a una lesión traumática de Lisfranc no diagnosticada ni tratada en fase aguda) pueden condicionar una inestabilidad secundaria. Para la estabilidad funcional del tobillo existe la necesaria coordinación entre un bucle cerrado o reflejo, bajo el control de la propiocepción regional y los tendones peroneos, y un bucle abierto o preparatorio del posicionamiento del tobillo, bajo el control neurológico superior, incluyendo la influencia visual y vestibular.

En este capítulo de la monografía se van a exponer nociones sobre anatomía funcional, biomecánica y patomecánica de la estabilidad del tobillo.

ANATOMÍA FUNCIONAL. ¿POR QUÉ ASÍ?

La articulación del tobillo es muy singular y no admite comparación con el resto de articulaciones del miembro inferior. Pero, como sucede en la articulación de la cadera, su estabilidad está ligada estrechamente a su forma y a su coaptación ósea.

Los huesos

La parte más craneal del astrágalo (tróclea) se mueve dentro de una cámara (mortaja tibioperonea) formada por los maléolos tibial y peroneo, y solidarizados entre sí por una sindesmosis. Los estudios de Hicks y Barnett revelan que la tróclea astragalina no es cilíndrica, sino que tiene una forma de cono truncado, alrededor de 4-6 mm más ancha por delante que por detrás^{1,2}. Las caras laterales del astrágalo no son iguales. La cara externa es mayor que la interna, y el radio de curvatura que describe también es mayor. Esta diferencia condiciona la forma de tronco de cono, con su vértice virtual proyectado hacia la parte interna. Estos detalles anatómicos justifican que cuando realicemos un movimiento de flexión dorsal del tobillo también se objetive un movimiento simultáneo de abducción en el plano transversal, y cuando exista una flexión plantar también se produzca una aducción asociada.

Si estudiamos la cobertura del astrágalo por la tibia y el peroné, observamos que el arco troclear medial mide unos 120° , estando unos 80° cubiertos por el maléolo tibial. Cuando realizamos una flexión dorsal del tobillo, el astrágalo presenta su parte anterior más ancha encajada en la mortaja. La sin-desmosis permite de manera controlada el movimiento tibioperoneo distal, permitiendo una separación y una rotación del peroné de alrededor de 1,5 mm. Esta posición de encaje se conoce en la bibliografía anglosajona con el nombre de *closed-packed position*³. Cuando realizamos flexión plantar del tobillo, la tróclea astragalina mantiene una relación de cobertura de sus dos tercios posteriores respecto del maléolo tibial, disposición que le confiere una estabilidad suficiente para la marcha.

Además de la contención ósea, la estabilidad lateromedial del tobillo se encuentra controlada por los ligamentos lateral y medial o deltoideo, y la estabilidad en el plano sagital determinada por las estructuras capsulares y la sin-desmosis. Los tendones que pasan alrededor del tobillo contribuyen también a la estabilización dinámica de la articulación tibioperoneotalar.

Los ligamentos

Existen varios complejos ligamentosos y otras estructuras que contribuyen a la estabilidad del tobillo.

Complejo sindesmal

La tibia y el peroné forman en la región del tobillo una anfiartrosis.

En la *sindesmosis del tobillo* encontramos el *ligamento tibioperoneo anteroinferior* (LTPAI) como una estructura que parte del tubérculo anterior de la tibia (tubérculo de Chaput) y cruza oblicuamente (describiendo un ángulo de 45°) la articulación hasta insertarse en la región anterior del peroné (tubérculo de Wagstaffe). Este ligamento es, con frecuencia, multifascicular con 2 o 3 porciones paralelas. Mide aproximadamente 16 mm de longitud y unos 16 mm de ancho en el origen tibial por unos 13 mm de ancho en la inserción peronea. El LTPAI es el componente más frecuentemente lesionado en la sindesmosis (fig. 1).



Figura 1. El ligamento tibioperoneo anteroinferior (LTPAI) es la estructura de la sindesmosis que se lesiona con mayor frecuencia. A) Artroscopia de cámara anterior de tobillo que demuestra la hipertrofia patológica del LTPAI. B) Después de la sinovectomía y extirpación del material sobrecrecido podemos observar la esquina anterolateral de la articulación tibioperoneoastragalina.

El *ligamento tibioperoneo posteroinferior* (LTPPI) es el componente más resistente del complejo sindesmal. Desciende posterolateralmente desde su origen en el tubérculo posterior de la tibia hasta insertarse en la región posterior y distal del peroné. Tiene una longitud de unos 20 mm, con una anchura de 18 mm en el origen tibial y de unos 12 mm en la inserción peronea. Comparado con el LTPAI, su mayor resistencia hasta la rotura hace que sea la estructura menos lesionada en la sindesmosis.

El *ligamento tibioperoneo transverso* (LTPT) tiene un aspecto fibrocartilaginoso que hace su funcionamiento similar al de un labrum, profundizando la

articulación tibiotalar y reforzando la cápsula posterior del tobillo. Con frecuencia se lo conoce como la porción profunda del LTPPI. Este ligamento se origina desde la región medial de la tibia y discurre horizontalmente hasta la inserción en el tubérculo posterior del peroné.

El *ligamento interóseo* (LIO) tiene forma piramidal con fibras cortas y potentes, dispuestas en abanico, que ocupan el espacio tibioperoneo distal. Este ligamento constituye el principal anclaje entre la tibia y el peroné. Se localiza unos 0,5-2 cm por encima de la interlínea articular y es una continuación directa de la membrana interósea. La membrana interósea conecta la tibia y el peroné en toda su longitud, pero no desempeña un papel importante como estabilizador de la sindesmosis.

La inestabilidad de la articulación tibioperonea distal también depende de la estructura ósea que contiene la región distal del peroné en la *incisura fibularis* de la tibia distal. La morfología de la *incisura fibularis* depende del tamaño de los tubérculos que forman la región anterior y posterior de la incisura. En estudios en cadáveres, la variedad más frecuente es la cóncava (75%), seguida de la convexa (16%), siendo en el resto de los casos irregular sin poder clasificarse en ninguno de los grupos previos⁴ (fig. 2). Es probable que las variantes cóncavas sean más estables que las convexas. En casos de lesión previa es muy útil realizar una tomografía computarizada de ambos tobillos para establecer una comparativa con el lado sano y valorar las necesidades de reconstrucción.

Complejo ligamentoso lateral

Se pueden distinguir varios ligamentos que conforman el complejo ligamentoso lateral del tobillo^{4,5}.

El *ligamento peroneoastragalino anterior* se encuentra en íntima relación con la cápsula articular. Se origina en el margen anterior del maléolo peroneo, hacia unos 10 mm proximal respecto de la punta del peroné. Con una anchura media de unos 6 a 10 mm, discurre anteromedialmente hasta su inserción en el cuerpo del astrágalo. Se sitúa casi horizontal cuando el tobillo se encuentra en posición neutra, pero se inclina hacia craneal con la dorsiflexión y hacia caudal con la flexión plantar del tobillo. En esta última posición y

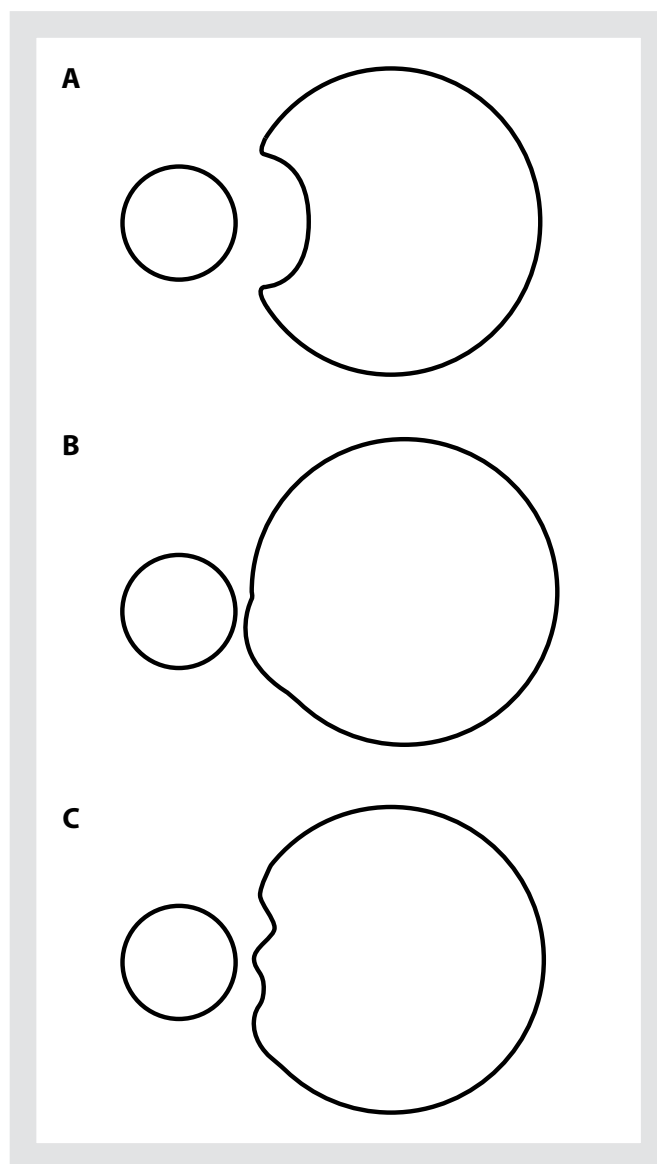


Figura 2. La *incisura fibularis* puede presentar una morfología cóncava (A) en el 75% de los casos, convexa (B) en el 16% o irregular (C) en el 9% restante.

con el pie situado en inversión, el ligamento es especialmente vulnerable a las lesiones.

El *ligamento peroneocalcáneo* se origina en la región anterior del maléolo peroneo, justo por debajo del peroneoastragalino anterior. En posición neutra del tobillo, el ligamento discurre oblicuo hacia abajo y hacia atrás para insertarse en la región lateral del calcáneo. Está cubierto por los tendones peroneos y contribuye a la estabilidad de la articulación subastragalina. Tiene una sección redondeada de unos 6-8 mm

de diámetro, y una longitud de unos 20 mm. El peroneocalcáneo es el único ligamento que cruza tanto la articulación tibiotalar como la subtalar. La inserción del ligamento y su eje de rotación permiten los movimientos de flexoextensión de la articulación tibiotalar y también los movimientos de la articulación subtalar. El ligamento peroneocalcáneo se *horizontaliza* durante la flexión dorsal del tobillo y se verticaliza durante la flexión plantar, manteniéndose en tensión durante todo el arco de movilidad de la articulación tibiotalar. Este ligamento se tensa con los movimientos de varo y se relaja con el valgo del tobillo.

El *ligamento peroneoastragalino posterior* se origina en la fosa maleolar de la superficie medial del maléolo peroneo y discurre casi horizontal hasta insertarse en la región posterolateral del astrágalo. Con la dorsiflexión del tobillo el ligamento se tensa, y con la flexión plantar y en posición neutra el ligamento se relaja. Tiene un carácter multifascicular y algunas de sus fibras contribuyen a formar el túnel para el tendón del flexor hallucis longus.

Complejo ligamentoso medial

El *ligamento colateral medial o deltoideo* es multifascicular y se compone de 2 capas, una superficial y una profunda. Desde su origen en el maléolo tibial se inserta en el astrágalo, en el calcáneo y en el navicular. La región posterior y media del ligamento se encuentra cubierta por el tendón tibial posterior. La descripción clásica de este ligamento^{6,7} diferencia 6 bandas en el ligamento deltoideo: 3 que son constantes (ligamento en hamaca o *tibiospring*, ligamento tibionavicular y ligamento tibiotalar posterior profundo) y otras 3 que son variables (ligamento tibiotalar posterior superficial, ligamento tibiocalcáneo, y ligamento tibiotalar anterior profundo).

Otros estabilizadores

Los tendones que cruzan el tobillo tienen una función de estabilización activa y pasiva de la articulación. La lesión de alguno de estos tendones puede comprometer la estabilidad del tobillo. También la articulación subtalar y la mediotarsiana influyen de manera indirecta o secundaria en la estabilidad tibio-

tal. Cualquier alteración en estas otras estructuras estabilizadoras puede causar un estrés tisular en los estabilizadores ligamentosos que acaben produciendo una inestabilidad funcional o anatómica. El cerebro es uno de los principales estabilizadores del tobillo porque es fundamental el circuito de preposicionamiento de pierna-tobillo-pie durante la fase de balanceo de la marcha, muy importante para que el contacto inicial del talón en el primer *rocker* se ejecute en una posición que permita la estabilización adecuada por parte del resto de los mecanismos comentados.

BIOMECÁNICA. ¿CÓMO FUNCIONA?

La estabilidad del tobillo depende del control neuromuscular, en gran medida reflejo, que ejercen nuestro sistema nervioso y nuestros músculos sobre el preposicionamiento, el posicionamiento y el apoyo en el suelo en la marcha y en el deporte. Durante la deambulación, funcionan conjuntamente los mecanismos neuromusculares del bucle abierto (preparatorio, preposicionamiento) y del bucle cerrado (reactivo, posicionamiento y contacto), y los mecanismos posturales voluntarios para mantener la correcta alineación y estabilidad en respuesta a las fuerzas de reacción del suelo sobre la articulación del tobillo.

La torsión del tobillo es un tema de interés dentro de la biomecánica general del tobillo. Close⁸ estudió el acoplamiento entre la torsión tibial en cadena cinética cerrada y la transmisión de esta rotación por parte del tobillo hacia la articulación subtalar y estimó la rotación vertical entre tibia y astrágalo en unos 5-6° durante la marcha normal. McCullough y Burge⁹ centraron su interés en la movilidad rotacional del astrágalo en el plano transversal y en el papel de los ligamentos lateral y medial en la restricción de esta rotación. Van Langelan¹⁰ estudió mediante estereofotogrametría especímenes osteoligamentosos sometidos a cargas axiales con marcadores de aluminio introducidos en sus huesos. Uno de los objetivos interesantes de su estudio era valorar el movimiento absoluto y relativo que experimentan los huesos tarsianos como consecuencia de la rotación externa de la tibia. El eje helicoidal del movimiento relativo de la tibia y el astrágalo era mucho más agudo en los primeros 10° de rotación tibial externa y disminuía

durante el resto de la rotación tibial. Posiblemente podamos entender que el pie admite un movimiento talar limitado sobre un eje vertical de unos 5-10° antes de experimentar una restricción en su excursión dentro de la mortaja, por la actuación de los ligamentos y por el contacto de las superficies articulares. Benink¹¹ utilizó el mismo montaje que van Lange-laan para mostrar que la cinemática tarsiana mostraba escasa variación en la marcha normal en un mismo individuo, pero era muy variable entre individuos, y concluyó que cada pie posee unas características individuales que lo hacen único. Hintermann et al¹² estudiaron el acoplamiento que se produce entre la rotación tibial y la eversión-inversión del pie, en piernas de cadáver en descarga y en carga. El acoplamiento inverso entre eversión-inversión del pie y rotación tibial no responde al patrón de una articulación universal, en la que la reciprocidad debería ser mecánicamente completa.

Los distintos estudios previos, aun con diferencias entre datos numéricos, muestran que existe una relación cinemática evidente entre la rotación tibial y la inversión/eversión del pie. El complejo articular tibioperoneoastragalino es capaz de absorber la energía generada por la rotación tibial en energía alrededor del eje mayor del pie. Esta transformación se encuentra bajo la influencia de la cantidad de carga vertical, las posiciones del pie, la integridad ligamentosa, la actividad muscular y las variables individuales. Durante la marcha, la superposición de las columnas externa e interna del pie permite el inicio del tercer *rocker*. La exorrotación del astrágalo transmite la rotación externa a la tibia y a la pierna (cadena cinética cerrada).

La movilidad primaria de la articulación del tobillo se desarrolla fundamentalmente en el plano sagital. El arco o rango de flexoextensión medio es de 43 a 63°, aunque solo 30° de este arco (10° de flexión dorsal y 20° de flexión plantar) son necesarios para una marcha estable. La rotación del astrágalo dentro de la mortaja del tobillo —10° de promedio— también debe considerarse importante para la comprensión de la biomecánica articular. La presencia de esta rotación convierte al tobillo en una articulación biplanar. Pero además, el astrágalo también experimenta movimientos de varo-valgo dentro de la mortaja tibioperonea,

lo que transforma el tobillo en una articulación triplanar.

El tobillo proporciona el segundo de los tres puntos de giro correlativos necesarios para la marcha. El talón, el tobillo y el antepié son los puntos de referencia de los tres *rockers* o rodillos de la marcha humana. El segundo *rocker* es el del tobillo. La oblicuidad del eje del tobillo condiciona que la flexión plantar se acompañe de una aducción, y la flexión dorsal asocie una abducción del pie. Cuando se realiza una flexión dorsal del tobillo, la asimetría de la tróclea del astrágalo origina una fuerza de compresión sobre el peroné. La sin-desmosis permite el acoplamiento elástico de esta compresión, y el peroné experimenta un desplazamiento en abducción, ascenso y rotación interna alrededor de su eje mayor diafisario. En la flexión plantar, el peroné realiza un descenso, una aducción y una rotación externa que acompañan armónicamente el movimiento de báscula del astrágalo.

Durante la fase de balanceo (pie y tobillo en el aire), el control neurológico (voluntario e involuntario) es fundamental en el preposicionamiento de los diferentes segmentos del miembro inferior para que el tobillo pueda tener un aterrizaje estable y absorber el impacto de manera segura durante el primer y el segundo *rocker*.

Durante el primer *rocker* de la marcha, en el momento del apoyo inicial del talón, el tobillo se encuentra en posición neutra para realizar, poco después, una flexión plantar pasiva. Cuando el antepié contacta con el suelo, la rotación de avance de la tibia deja de tomar como referencia el talón para centrarse sobre el astrágalo, experimentando el tobillo un movimiento de flexión dorsal pasiva. El segundo *rocker*, o *rocker* del tobillo, se corresponde con el período de apoyo intermedio durante el cual el pie tiene una disposición plantígrada respecto del suelo. Cuando el talón despega se inicia el tercer *rocker*, en el que el tobillo realiza una dorsiflexión de unos 10-15°, seguida de una flexión plantar rápida de unos 10-20°¹³. El arco de flexoextensión del tobillo durante la marcha normal se estima en unos 30-35°. Este arco de movilidad condiciona numerosas alteraciones de la marcha cuando existe una patología que limita la excursión del astrágalo dentro de la mortaja. La flexión dorsal del tobillo, con menor

margen de los grados de movilidad necesarios para la marcha, suele ser el factor limitante para una marcha patológica después de una lesión que afecte a uno o varios de los componentes de la articulación tibioepironeoastagalina.

El control muscular del segundo *rocker* corresponde al sóleo. El sóleo es la única parte del tríceps sural que se activa durante la fase de apoyo intermedia, frenando por su acción excéntrica la progresión por inercia de la tibia. Cuando se estudia el movimiento de la articulación del tobillo durante la marcha, se puede caer en el error de infravalorar el desplazamiento en los planos frontal y transversal. El movimiento en estos dos planos comprende la combinación de los movimientos de las articulaciones del tobillo y subastragalina. No sería correcto asumir que la articulación subtalar es la responsable del movimiento en el plano frontal y transversal del complejo articular peritalar, y que el tobillo lo es del movimiento en el plano sagital. Los estudios en cadáveres de McCullough y Burge⁹, y los estudios invasivos in vivo de Lundberg et al¹⁴ demostraron la existencia de una movilidad de entre 8 y 10° en el plano transversal. El tobillo no se limita a transferir un momento de movimiento transversal a la articulación subastragalina, sino que experimenta un movimiento propio en este plano. De hecho, en algunos estudios se cuestiona el papel de protagonista secundario (y no principal) del tobillo en el movimiento en el plano transversal¹⁵.

El tobillo también puede experimentar cambios en su biomecánica marcados por la utilización de calzados diferentes (tacón, tipo de suela, etc.). La moda de los calzados con suela en balancín es una realidad en nuestro entorno. La suela en balancín (*rocker-bottom*, *rocker barrel*) es un recurso conocido desde hace mucho tiempo en la ortopedia y entre los zapateros tradicionales. El acoplamiento en la suela de uno o dos balancines permitía una marcha más fluida y cómoda para los pacientes con problemas de dolor y disminución de movilidad en un tobillo, favoreciendo una transición más rápida y cómoda desde el primer *rocker* al tercer *rocker*. La popularidad de los calzados con suela en balancín integrada (Masai Barefoot Technology [MBT], Skechers Shape-Ups, etc.) ha estimulado la realización de estudios biomecánicos para comprobar los efectos de este tipo de

calzado sobre la marcha. Romkes et al¹⁶ analizaron los cambios en la marcha y en los registros electromiográficos en personas que utilizaban zapatos MBT. La teoría de partida de este concepto de calzado es la transformación de una superficie dura y plana de un calzado convencional en una superficie irregular e inestable, simulando la marcha descalza de nuestros antepasados y estimulando la musculatura del pie y de la pierna. En el estudio que publican se investigaron los cambios provocados por el calzado MBT en el patrón de marcha y en la activación muscular. Mediante estudios de electromiografía de superficie y de análisis de la marcha, se intentó comparar la marcha de sujetos adultos sanos con calzado convencional y con calzado MBT. Los resultados mostraron que existía un cambio del patrón de marcha con el calzado MBT, que se manifestaba en un aumento de la actividad muscular de los gastrocnemios y del tibial anterior, y con una contracción simultánea que podría proporcionar mayor estabilidad al complejo articular del tobillo. En teoría, este tipo de calzado podría utilizarse como entrenamiento muscular de la pierna, pero debe usarse con cautela en pacientes con problemas de rodilla (inestabilidad, artrosis) porque obliga a mantener una moderada flexión de la rodilla durante la fase de apoyo (sin conseguir llegar a la extensión casi completa de la rodilla durante el segundo *rocker*), con un aumento de actividad considerable del vasto medial y del lateral. La actividad del recto anterior se reducía durante la transición del segundo al tercer *rocker*. En el tobillo, el ángulo de dorsiflexión en el momento del contacto inicial (primer *rocker*) aumentaba con los zapatos MBT, para pasar a experimentar un movimiento de flexión plantar continuo. Con los calzados con suela en balancín, la transición entre el segundo y tercer *rocker* es más fluida y pueden mejorar el dolor y la marcha en pacientes con limitación de la movilidad en el tobillo por secuelas traumáticas y/o artrosis.

PATOMECAÍNICA. DEL LABORATORIO A LA CONSULTA Y AL QUIRÓFANO

Los diferentes mecanismos de lesión del tobillo conllevan implicaciones patomecánicas diferentes y pueden acabar produciendo inestabilidad tibiotalar.

Consideraciones patomecánicas

Durante las últimas décadas existe un interés en comprender la contribución relativa del tobillo en la dinámica de la marcha y la conjunción con otras articulaciones y estructuras del miembro inferior¹⁷. La transmisión de cargas, el movimiento, y la comprensión de la marcha y sus alteraciones han sido, son y serán objeto de estudio. Es interesante correlacionar la biomecánica del tobillo con sus mecanismos lesionales y con su patomecánica.

Las correcciones posturales ante una torsión del tobillo suceden primero en la articulación subastragalina. La sinergia de estabilización del tobillo —correcciones posturales que suceden en el tobillo— se manifiesta mediante movimientos correctores de inversión y eversión para intentar mantener el pie estable sobre el centro de gravedad del miembro inferior. Si existe una sinergia adecuada no se producirán fuerzas de cizallamiento, y cualquier fuerza que reciba el pie se contrarrestará con las fuerzas que actúan en el centro de gravedad. Los momentos que actúan en el tobillo dependen de las líneas de fuerza que se generan por la fuerza de reacción del suelo sobre la articulación subastragalina. La fuerza de reacción del suelo suele actuar en una posición lateral al eje subastragalino y anterior al eje de la articulación del tobillo. La carga en localización más lateral suele *evertir y dorsiflexionar* el tobillo. Los momentos de fuerzas que se generan son contrarrestados por unos músculos flexores plantares e inversores muy potentes.

Cuando el pie realiza una eversión, el eje de la subastragalina se desplaza hacia medial; y cuando el pie se invierte, el eje de la subastragalina se desplaza hacia lateral. En inversión y en carga, el tobillo tiende a producir una carga externa que fuerza todavía más la inversión. Los músculos eversores (pronadores) no son suficientemente potentes como para soportar una carga corporal con un brazo de palanca mayor de 3-4 cm. Si se añade una fuerza de cizallamiento, se multiplican rápidamente los momentos inversores y puede producirse una entorsis. Con el pie descalzo, el tobillo no suele experimentar momentos porque el eje de la reacción de fuerzas del suelo rara vez supera el eje de la articulación subastragalina¹⁸.

De manera clásica, creemos que la información propioceptiva que se origina en los ligamentos del tobillo

proporciona la mayoría de la información que permite al tobillo producir respuestas motoras apropiadas para prevenir o minimizar lesiones¹⁹. Aparentemente, la lesión de los ligamentos del tobillo también daña los propioceptores existentes en esos ligamentos. En el contexto propioceptivo, la rehabilitación del tobillo intenta mejorar la coordinación y reeducar los reflejos periarticulares. Pero es curioso que la teoría del sistema mecanorreceptor, y su valor en la lesión y la rehabilitación, no hayan podido probarse científicamente. Aunque el tratamiento sea eficaz en muchos casos, todavía no se conocen los mecanismos subyacentes. Actualmente se sabe que el control motor se encuentra bajo el control de múltiples receptores (cutáneos, articulares, ligamentosos, musculares). Es curioso que la anestesia local de los ligamentos laterales del tobillo tenga tan poco efecto sobre la propiocepción articular y, sin embargo, una tobillera estabilizadora mejore la percepción del tobillo en el espacio. Esta situación sugiere que los mecanorreceptores cutáneos podrían ser más importantes que los ligamentosos en la información propioceptiva del tobillo²⁰.

La forma de la mortaja tibioperonea confiere al tobillo una estabilidad ósea intrínseca, que es cuantificable como la cobertura tibiotalar en la flexión dorsal y plantar del tobillo. Se podría pensar que las variantes individuales de cobertura ósea de la tróclea astragalina podrían relacionarse con una mayor estabilidad o inestabilidad. Frigg et al²¹ plantearon la influencia biomecánica de la contención tibiotalar en la estabilidad del tobillo. En su estudio realizaban la medición y comparación, en radiografías en proyección lateral, del radio talar y de la cobertura tibial del astrágalo en pacientes con inestabilidad crónica del tobillo y en pacientes control. En los pacientes con una inestabilidad crónica del tobillo, el radio del astrágalo era mayor y la cobertura tibiotalar menor. Con estos resultados, se planteó la posibilidad más precoz de una estabilización quirúrgica en estos pacientes con una configuración ósea más inestable. Además, recomendaban ser muy cautos en las queilectomías anteriores del tobillo en pacientes con una menor cobertura ósea talar, pues la resección osteofitaria amplia en la región anterior del tobillo puede aumentar la inestabilidad y disminuir el momento de fuerzas necesario para producir una luxación (fig. 3).

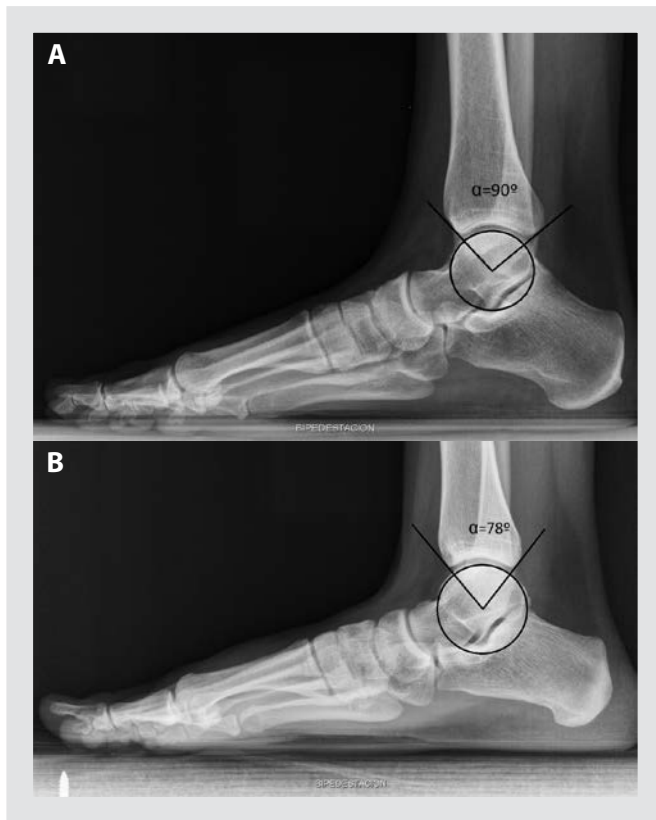


Figura 3. La configuración ósea del tobillo, según la cobertura talotibial puede presentar una configuración más estable (A, cobertura 90°) o menos estable (B, cobertura 78°).

Mecanismo lesional

Los estudios de Rasmussen²² mostraban que el vector de fuerzas de un traumatismo influye de manera decisiva en las estructuras lesionadas y en el orden y la magnitud de las diferentes lesiones. Así, cuando hay un traumatismo con una fuerza extensora, la flexión dorsal del tobillo lesiona el ligamento colateral medial o deltoideo, mientras que las fuerzas flexoras plantares lesionan el ligamento lateral externo. Las fuerzas rotacionales externas pueden producir la lesión del fascículo profundo del ligamento deltoideo y, con posterioridad, del fascículo superficial. Las fuerzas rotacionales internas lesionarán los fascículos peroneoastragalino anterior y posterior del ligamento lateral externo. Los traumatismos en abducción del pie lesionan primero las fibras del fascículo superficial del ligamento colateral medial, respetando las profundas.

Las fuerzas de aducción lesionan el ligamento peroneocalcáneo. En la lesión ligamentosa más frecuente del tobillo, la inversión del pie lesiona en primer lugar el fascículo peroneoastragalino anterior del ligamento lateral externo.

La estabilidad de la sindesmosis se mantiene durante la marcha gracias a los potentes ligamentos sindesmales. La sindesmosis, sometida a diferentes tipos de fuerzas durante la actividad deportiva, puede llegar a lesionarse habitualmente como resultado de una fuerza importante en rotación externa. El ligamento TPAI contribuye al 35% del total de la estabilidad de la sindesmosis, el LTPT al 33%, el LIO al 22% y el LTPPI al 9%, cuando estos ligamentos han sido secuencialmente cortados en estudios en cadáveres^{23,24}. En estos estudios, la rotura de dos de los ligamentos reducía a la mitad la resistencia de la sindesmosis y era origen de inestabilidad. En otros estudios en cadáveres, la sección del LTPAI aumentaba la traslación talar 7,3 mm con la rotación externa, llegando a más de 10 mm cuando se seccionaban todos los ligamentos²⁵. El mecanismo lesional más frecuente de la sindesmosis presenta un momento de rotación externa sobre un tobillo posicionado en dorsiflexión y pronación. El astrágalo es forzado en la rotación externa contra el peroné, separándolo de la tibia, lo que lesiona primero el LTPAI. Si la rotación externa continúa se produce la lesión consecutiva del LIO y de la membrana interósea, para finalmente romperse o avulsionarse el LTPPI y el LTPT. El momento final de esta lesión, si persiste la fuerza actuante, produciría una fractura del peroné. La rotación externa inicial del astrágalo sobre la tibia podría también romper el ligamento deltoideo o causar una fractura maleolar tibial. Las roturas completas aisladas de la sindesmosis son poco frecuentes. En algunos deportes, como el esquí o el *hockey*, la utilización de botas para inmovilizar el tobillo y proteger los ligamentos laterales pone a la sindesmosis en un mayor riesgo de lesión con la rotación externa. En otros deportes menos frecuentes en nuestro medio, como el rodeo americano, el tobillo también está sometido a mayores momentos de rotación externa y las lesiones sindesmales pueden llegar a representar un 75% de todas las lesiones de tobillo, frente al 10-20% en otros deportes y el 1-17% en la población general²⁶.

Inestabilidades: no todas son iguales

Cuando se valora a un paciente con inestabilidad de tobillo es importante diferenciar entre la variante anatómica (mecánica) y la funcional. En ocasiones ambas coexisten en el mismo paciente.

La *inestabilidad anatómica o mecánica* se refiere a la laxitud medible (con exploración clínica o con pruebas de imagen o mecánicas) de la articulación, que suele acompañarse de cambios degenerativos y sinovitis. El tratamiento de la inestabilidad mecánica mediante técnicas de cirugía abierta y artroscópica se tratará en otro capítulo de esta monografía.

La *inestabilidad funcional* se refiere a la “sensación de fallo” que el paciente experimenta en circunstancias no forzadas para el tobillo y que no se acompaña de una laxitud mecánica. La inestabilidad funcional es mucho más frecuente que la anatómica. En algunos casos podría explicarse por la inhibición muscular artrogénica, que se entiende como una inhibición continuada de la musculatura que rodea una articulación que se encuentra inflamada o dañada por una lesión previa²⁷. Otra de las explicaciones patomecánicas de la inestabilidad funcional sería la alteración en los bucles neuromusculares del control sobre el tobillo.

Control neuromuscular

Los patrones cerebrales y medulares de control postural también parecen influir en la estabilidad del tobillo. Aparentemente, los estudios en los tiempos de activación de los músculos cuyos tendones atraviesan el tobillo concluyen que la debilidad muscular no es un factor contribuyente mayor en el tobillo con inestabilidad crónica, pero la alteración en el equilibrio muscular sí parece ser un factor predictivo de lesión en la práctica de deportes^{28,29}. Los tobillos con una mayor potencia en flexión plantar y una disminución en el cociente dorsiflexión-flexión plantar tienen una mayor incidencia de esguinces por inversión.

El control de *bucle cerrado* de la estabilidad del tobillo se basa en un arco reflejo iniciado después del envío a la médula espinal de una señal aferente generada tras la activación de los mecanorreceptores del tobillo, y que emite una señal eferente hacia los husos de la musculatura correspondiente que se contrae para oponerse al estiramiento. Cuando se aproxi-

ma el inicio del primer *rocker* puede comprobarse el aumento de actividad electromiográfica de los flexores y extensores del tobillo para preparar el impacto. Los pacientes con inestabilidad del tobillo muestran una menor activación de la musculatura peronea antes del impacto que las personas con tobillos estables³⁰.

El control de *bucle abierto* de la estabilidad del tobillo parece más importante que el cerrado. Durante la fase de balanceo de la marcha (pie/tobillo en el aire) se desencadena una cascada de acontecimientos neuromusculares que preparan el tobillo frente al impacto. La actividad muscular que se origina se conoce como *preactivación* y su modulación anticipada está bajo el control de la coactivación de las motoneuronas alfa-gamma y su efecto sobre los husos musculares. Esta modulación está regulada por diferentes estímulos visuales y vestibulares, y con el patrón cerebral integrado del conocimiento de experiencias previas similares que preposicionan el tobillo en la configuración más fácil de estabilizar. De la biomecánica y la patomecánica del aterrizaje del paso se aprende que un aumento de la dorsiflexión del tobillo es un mecanismo protector que permite la configuración más estable de encaje de la mortaja. Este mecanismo no está mediado por los reflejos periféricos, sino por los mapas motores preprogramados³¹. Tal vez por este motivo, los pacientes con una disminución de la dorsiflexión del tobillo tras una lesión traumática o una cirugía tengan una mayor incidencia de inestabilidad funcional.

CONCLUSIONES

Cada paso es una sucesión de acontecimientos biomecánicos potencialmente inestables que, afortunadamente, en la mayoría de las ocasiones no acaban produciendo una entorsis de tobillo.

La anatomía funcional, la biomecánica y la patomecánica del tobillo ayudan a comprender su funcionamiento y su lesión. También es importante conocer los mecanismos que influyen en la estabilidad articular, que son una combinación de elementos óseos, ligamentosos, tendinosos, musculares, neurológicos reflejos y voluntarios.

La estabilidad del tobillo se inicia en el preposicionamiento de pierna-tobillo-pie, mucho antes del

impacto del talón con el suelo, y es necesaria hasta el final del despegue del pie. Los episodios de entorsis de repetición podrían alterar los mecanismos de la estabilidad articular y crear una disfunción neuromuscular y ligamentosa artrogénica dolorosa y/o limitante.

Los avances en el conocimiento de los tipos de inestabilidad crónica del tobillo (anatómica y funcional) permiten prevenir y curar a muchos pacientes con lesiones articulares tibioperoneoastragalinas.

Bibliografía

- Hicks JH. The mechanics of the foot. I. The joints. *J Anat.* 1953;87:345-357.
- Inman VT. The joints of the ankle. Baltimore: Williams and Wilkins; 1976.
- Fick R. Handbuch der anatomie und mechanik der gelenke: III. Spezielle Gelenk-und Muskelmechanik. Jena: Verlag Gustav Fischer; 1911.
- Sarrafian SK. Anatomy of the foot and ankle. Descriptive, topographic, functional. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott; 2011. p. 159-217.
- Golanó P, Vega J, De Leeuw PA, Malagelada F, Manzanares MC, Götzens V, et al. Anatomy of the ankle ligaments: a pictorial essay. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2010;18:557-69.
- Milner CE, Soames RW. Anatomical variations of the anterior talofibular ligament of the human ankle joint. *J Anat.* 1997;191:457-8.
- Milner CE, Soames RW. Anatomy of the collateral ligaments of the human ankle joint. *Foot Ankle Int.* 1998;19:757-60.
- Close JR. Some applications of the functional anatomy of the ankle joint. *J Bone Joint Surg Am.* 1956;38:761-81.
- McCullough CJ, Burge PD. Rotatory stability of the load-bearing ankle. An experimental study. *J Bone Joint Surg Br.* 1980;62:460-4.
- Van Langelaan EJ. A kinematical analysis of the tarsal joints. An X-ray photogrammetric study. *Acta Orthop Scand Suppl.* 1983;204:1-269.
- Benink RJ. The constraint-mechanism of the human tarsus. A roentgenological experimental study. *Acta Orthop Scand Suppl.* 1985;215:1-135.
- Hintermann B, Nigg BM, Sommer C, Cole GK. Transfer of movement between calcaneus and tibia in vitro. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 1994;9:349-55.
- Núñez-Samper M, Llanos Alcázar LF, Viladot R. Biomecánica, medicina y cirugía del pie. Barcelona: Masson; 1997.
- Lundberg A, Goldie I, Kalin B, Selvik G. Kinematics of the ankle/foot complex: plantarflexion and dorsiflexion. *Foot Ankle.* 1989;9:194-200.
- Nester CJ, Findlow AF, Bowker P, Bowden P. Transverse plane motion at the ankle joint. *Foot Ankle Int.* 2003;24:164-8.
- Romkes J, Rudmann C, Brunner R. Changes in gait and EMG when walking with the Masai Barefoot Technique. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2006;21:75-81.
- Bonnel F, Toullec E, Mabit C, Tourné Y, Sofcot. Chronic ankle instability: biomechanics and pathomechanics of ligaments injury and associated lesions. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2010;96:424-32.
- Leardini A, O'Connor JJ, Catani F, Giannini S. The role of passive structures in the mobility and stability of the human ankle joint: a literature review. *Foot Ankle Int.* 2000;21:602-15.
- Lentell GL, Katzman LL, Walters MR. The relationship between muscle function and ankle stability. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1990;11:605-11.
- Konradsen L, Ravn JB, Sørensen AI. Proprioception at the ankle: the effect of anaesthetic blockade of ligament receptors. *J Bone Joint Surg Br.* 1993;75:433-6.
- Frigg A, Frigg R, Hintermann B, Barg A, Valderrabano V. The biomechanical influence of tibio-talar containment on stability of the ankle joint. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2007;15:1355-62.
- Rasmussen O. Stability of the ankle joint. Analysis of the function and traumatology of the ankle ligaments. *Acta Orthop Scand Suppl.* 1985;211:1-75.
- Ogilvie-Harris DJ, Reed SC. Disruption of the ankle syndesmosis: diagnosis and treatment by arthroscopic surgery. *Arthroscopy.* 1994;10:561-8.
- Boden SD, Labropoulos PA, McCowin P, Lestini WF, Hurwitz SR. Mechanical considerations for the syndesmosis screw. A cadaver study. *J Bone Joint Surg Am.* 1989;71:1548-55.
- Xenos JS, Hopkinson WJ, Mulligan ME, Olson EJ, Popovic NA. The tibiofibular syndesmosis. Evaluation of the ligamentous structures, methods of fixation, and radiographic assessment. *J Bone Joint Surg Am.* 1995;77:847-56.
- Slawski DP, West OC. Syndesmotic ankle injuries in rodeo bull riders. *Am J Orthop (Belle Mead NJ).* 1997;26:794-7.
- Gutierrez GM, Kaminski TW, Douex AT. Neuromuscular control and ankle instability. *PM R.* 2009;1:359-65.
- DeCarlo MS, Talbot RW. Evaluation of ankle joint proprioception following injection of the anterior talofibular ligament. *J Ortho Sport Phys Ther.* 1986;8:70-6.
- Konradsen L, Voigt M, Højsgaard C. Ankle inversion injuries. The role of the dynamic defense mechanism. *Am J Sports Med.* 1997;25:54-8.
- Caulfield B, Crammond T, O'Sullivan A, Reynolds S, Ward T. Altered ankle-muscle activation during jump landing in participants with functional instability of the ankle joint. *J Sport Rehabil.* 2004;13:189-200.
- Caulfield BM, Garrett M. Functional instability of the ankle: differences in patterns of ankle and knee movement prior to and post landing in a single leg jump. *Int J Sports Med.* 2002;23:64-8.