



PUESTA AL DÍA

Sistema de reparto de cargas del arco longitudinal del pie



Kevin A. Kirby^{a,b}

^a Departamento de Biomecánica Aplicada, California School of Podiatric Medicine en Samuel Merritt College, Oakland, California, EE. UU

^b Práctica Privada, Sacramento, California, EE. UU

Recibido el 26 de febrero de 2017; aceptado el 6 de marzo de 2017

Disponble en Internet el 1 de abril de 2017

PALABRAS CLAVE

Arco longitudinal;
Biomecánica del pie;
Fascia plantar;
Músculos plantares intrínsecos;
Músculos plantares extrínsecos;
Ligamentos plantares;
Sistema de reparto de cargas;
Control del sistema nervioso central;
Tibial posterior;
Biomecánica de la marcha

KEYWORDS

Longitudinal arch;
Foot biomechanics;
Plantar fascia;

Resumen El arco longitudinal del pie humano es una estructura mecánica compleja que debe ser flexible en superficies irregulares, y también tener suficiente rigidez para permitir al pie comportarse como un órgano propulsivo eficaz durante la marcha y la carrera. Para realizar esas funciones el arco longitudinal tiene un sistema único de 4 capas de reparto de cargas formado por la fascia plantar, los músculos plantares intrínsecos, los músculos plantares extrínsecos y los ligamentos plantares. Estas 4 capas de elementos de soporte de carga tensio-nal, trabajando conjuntamente con los elementos óseos que componen el arco longitudinal, trabajan sinérgicamente para aumentar la rigidez del arco longitudinal en situaciones de carga. Los elementos pasivos de soporte de carga tensio-nal de este sistema son la fascia plantar y los ligamentos plantares que no están bajo el control directo del sistema nervioso central, y sirven para aumentar la rigidez del arco longitudinal con un mecanismo de rigidez automático que se basa en la tensión del tendón de Aquiles y en la carga plantar del antepié. Los elementos activos de soporte de carga tensio-nal son los músculos plantares intrínsecos y extrínsecos que están bajo control directo del sistema nervioso central y sirven para aumentar o disminuir la rigidez de los arcos longitudinales medial y lateral, dependiendo del tipo e intensidad de la actividad predominante de carga del individuo. Juntos, los elementos del sistema de reparto de cargas del arco longitudinal aseguran una función correcta del arco longitudinal en carga, incluso cuando uno de estos elementos falla por lesión.

© 2017 Consejo General de Colegios Oficiales de Podólogos de España. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Longitudinal arch load-sharing system of the foot

Abstract The longitudinal arch of the human foot is a complex mechanical structure that must be compliant on uneven surfaces and also have sufficient stiffness to allow the foot to be an efficient propulsive organ during walking and running gait. To serve these functions, the

Correo electrónico: kevinakirby@comcast.net

<http://dx.doi.org/10.1016/j.repod.2017.03.002>

0210-1238/© 2017 Consejo General de Colegios Oficiales de Podólogos de España. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Plantar intrinsic muscles;
 Plantar extrinsic muscles;
 Plantar ligaments;
 Load-sharing system;
 Central nervous system control;
 Tibial posterior muscle;
 Walking biomechanics

longitudinal arch has a unique four-layer load-sharing system consisting of the plantar fascia, plantar intrinsic muscles, plantar arch extrinsic muscles and plantar ligaments. These four layers of tension load-bearing elements, working together with the osseous elements which serve as the framework of the longitudinal arch, work synergistically to increase longitudinal arch stiffness during weightbearing activities. The passive tension load-bearing elements of this load-sharing system, the plantar fascia and plantar ligaments, are not under direct central nervous system control and thus serve to stiffen the longitudinal arch with an automatic stiffening mechanism that is based on Achilles tendon tension and plantar forefoot loading. The active tension load-bearing elements, the plantar intrinsic and plantar extrinsic muscles, are under direct central nervous system control and serve to increase or decrease the stiffness of the medial and lateral longitudinal arches depending on the type and intensity of the prevailing weightbearing activity of the individual. Together, the elements of the longitudinal arch load-sharing system ensure that proper weightbearing function of the longitudinal arch, and the foot and lower extremity, can still occur even when a failure of one of these tension load-bearing elements occurs due to injury.

© 2017 Consejo General de Colegios Oficiales de Podólogos de España. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

Leonardo Da Vinci (1452-1519) el pintor, escultor, arquitecto e inventor renacentista definió el pie humano como «una obra maestra de ingeniería y una pieza de arte»¹. Entre sus notas hay múltiples dibujos y descripciones de la forma y la silueta del pie humano que demuestran claramente las observaciones de Da Vinci sobre el arco longitudinal del pie y cómo este cambia de forma durante las actividades de carga².

El arco longitudinal del pie ha sido también el foco de atención de profesionales médicos durante generaciones. Hace más de un siglo, en 1896, un cirujano ortopédico de Nueva York, Royal Whitman, describió cómo el colapso del arco longitudinal del pie podía crear la condición conocida como «pie debilitado», que en aquella época era también conocida como «pie plano», «pie expandido» y «pie pronado»^{3,4}. Por su parte, los pies con arcos longitudinales elevados, primeramente llamados pies cavos por Little en 1853, eran una condición también conocida en aquel tiempo como «pie excavado», «pie en garra», «pie enrollado», «pie arqueado» y «equino anterior»^{5,6}.

Incluso en la actualidad podólogos y clínicos en general todavía prestan mucha atención al arco longitudinal como una de las estructuras más importantes del pie humano. La presencia de valores extremos en la altura del arco longitudinal se cree que puede llevar a proceso patológico y disfunción del pie. Mahan y Flanigan señalaron que los individuos con disminución del arco longitudinal, o pie plano, pueden sufrir de dolor, fatiga, degeneración articular y podría estar asociado a deformidades como hallux valgus, dedos en garra y metatarsalgia⁷. Los individuos con un aumento del arco longitudinal, o pie cavo, ha sido descrito por Smith y Green como posible causa de estrés anormal en la carga, inestabilidad del pie y tobillo, restricción de la movilidad del pie y dificultad para encontrar calzado⁵.

Durante generaciones los profesionales sanitarios han considerado el arco longitudinal del pie como una estructura muy importante y un componente funcional del pie y de la extremidad inferior, y es importante para el podólogo

y el clínico entender de forma completa las características biomecánicas del arco longitudinal durante las actividades de carga. De hecho, un nuevo concepto en la biomecánica del arco longitudinal, el sistema de reparto de cargas del arco longitudinal (SRCAL), que fue primeramente descrito por Kirby en 2012⁸, se describirá en el presente artículo para ayudar a explicar el complejo balance mecánico de fuerzas que actúan en el arco longitudinal con el que se permite al pie tener un balance perfecto, tanto en flexibilidad como en estabilidad a lo largo del tiempo a pesar de su uso repetitivo durante años.

Conceptos de ingeniería en los sistemas de reparto de cargas

La idea de los sistemas de reparto de cargas es un concepto comúnmente aplicado a sistemas eléctricos y mecánicos donde la redundancia o superposición de las operaciones es vital para la fiabilidad del sistema como unidad. Ejemplos de sistemas de reparto de cargas son el uso de múltiples cables de soporte en los puentes de suspensión, el uso de múltiples motores en aviones, el uso de múltiples generadores eléctricos en sistemas de generación de energía, el uso de múltiples procesadores en ordenadores o múltiples servidores en sistemas de ordenadores conectados, entre otros. En un sistema de reparto de cargas la carga sobre el sistema es igualmente o desigualmente repartida entre los diferentes componentes del sistema. De esta forma, cuando un componente falla, el sistema se mantiene operativo, pero las cargas que ahora asumen los componentes restantes del sistema de reparto de cargas aumentan. A su vez, si todos los componentes del sistema se mantienen operativos, las cargas en cada componente del sistema de reparto de cargas serán más reducidas^{9,10}.

Un tipo muy familiar de sistema de reparto de cargas, que es mecánicamente análogo al arco longitudinal del pie, se encuentra en la suspensión trasera de camiones, donde tanto las suspensiones en ballesta del eje trasero como los amortiguadores comunes se usan para soportar y amortiguar

las aceleraciones verticales del chasis del camión y del eje trasero del mismo. Tanto las suspensiones de ballesta como los amortiguadores trabajan de forma conjunta para endurecer la suspensión trasera y ayudar a prevenir que el chasis del camión choque o contacte sobre el eje trasero del camión cuando se conduce con el camión muy cargado o sobre carreteras muy bacheadas. Tanto las suspensiones en ballesta como los amortiguadores volverán a su forma menos comprimida cuando disminuya la carga en el camión. Si los amortiguadores fallan en el sistema de reparto de cargas de la suspensión trasera del camión, las suspensiones en ballesta aumentarán mucho su carga. Igualmente, si las suspensiones en ballesta fallan, los amortiguadores aumentarán su carga. Sin embargo, cuando ambos componentes del sistema de reparto de cargas sobre la suspensión trasera funcionan de forma apropiada, tanto las suspensiones en ballesta como los amortiguadores comunes tendrán una disminución de las cargas que tienen que soportar con el uso del vehículo.

Los avances tecnológicos recientes actuales permiten una rigidez variable de los amortiguadores para la suspensión de los vehículos que puede ser ajustada de forma automática por microprocesadores, o puede ser manualmente ajustada por el conductor para mejorar la comodidad y las características del manejo del vehículo^{11,12}. La utilidad de esta analogía mecánica entre la suspensión trasera de un camión y el arco longitudinal del pie se ve más clara en los siguientes apartados que revisan la estructura, la función y los mecanismos de control tanto activos como pasivos que funcionan en el SRCAL del pie durante las actividades de carga.

Elementos de soporte de las fuerzas compresivas del sistema de reparto de cargas del arco longitudinal

Ya que el arco longitudinal del pie está sometido a cargas externas significativas provenientes de las fuerzas reactivas del suelo (FRS) durante las actividades de carga, debería de tener un sistema por el que no solo soporte esas cargas, si no que a su vez sirva para soportar esas cargas con un grado variable de rigidez. Los picos de las FRS durante la marcha varían de 1,1 a 1,5 veces el peso corporal, mientras que durante la carrera los picos de FRS doblan esos valores de la marcha¹³. Durante actividades de salto las FRS que actúan en la superficie plantar del pie pueden fácilmente sobrepasar 4 veces el peso corporal¹⁴.

Estas magnitudes de FRS potencialmente elevadas, que actúan sobre el aspecto plantar del pie, tienden a aplanar y alargar temporalmente el arco longitudinal del pie. Cuando las FRS se reducen o desaparecen del aspecto plantar del pie el arco longitudinal vuelve a su forma más elevada y acortada. Por lo tanto, así como la suspensiones en ballesta en el sistema de suspensiones de la parte trasera del camión que hemos mencionado anteriormente, que se deforman bajo carga y recuperan su forma cuando la carga se reduce, el arco longitudinal del pie se deforma bajo la acción de las FRS y posteriormente recupera su forma original una vez que desaparece la carga. Este ciclo de carga-descarga del arco longitudinal ocurre cientos de veces al día durante las actividades en carga diarias de un individuo.

Para poder funcionar día tras día y año tras año con este muelle natural, el arco longitudinal del pie tiene múltiples

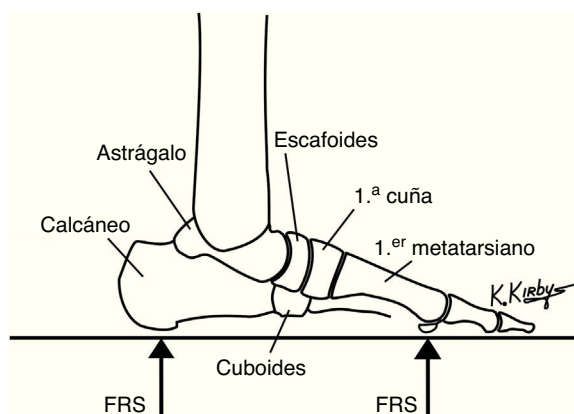


Figura 1 Los elementos óseos de soporte de carga compresiva sirven para proveer un marco estructural del arco longitudinal. El astrágalo y el calcáneo forman el retropié, y el escafoides, cuboides, cuñas y los metatarsianos forman el antepié. El aplanamiento del arco longitudinal, que engloba los movimientos de plantarflexión del retropié y dorsiflexión del antepié ocurren cuando las fuerzas reactivas del suelo (FRS) actúan sobre el retropié y antepié plantar. La elevación del arco longitudinal, que engloba la dorsiflexión del retropié y la plantarflexión del antepié, ocurre cuando las FRS se reducen en la planta del pie.

componentes que permiten un control tanto pasivo como activo de su función. Lo primero, las características mecánicas del complejo estructural del arco longitudinal, es decir, los huesos del arco longitudinal necesitan discutirse inicialmente. Las estructuras óseas del arco longitudinal son los elementos de soporte de la carga compresiva del pie que permiten al pie ser capaz de resistir las fuerzas de carga compresivas que actúan en y sobre el pie durante las actividades de carga. Además, el hueso no es solo excelente para resistir estas fuerzas de carga compresivas, sino que también es muy bueno para resistir las fuerzas de doblado y torsionales¹⁵.

El retropié, que consiste en el astrágalo y el calcáneo, se plantarflexiona en relación con el suelo con el aplanamiento del arco longitudinal, y se dorsiflexiona con relación al suelo con la elevación del arco longitudinal (fig. 1). El antepié, que consiste en el escafoides, cuboides, cuñas y huesos metatarsales, se dorsiflexiona con relación al retropié con aplanamiento del arco longitudinal y se plantarflexiona con relación al retropié cuando existe elevación del arco longitudinal. Cada elemento óseo del arco longitudinal, al igual que los travesaños de madera en el tejado de una casa, pueden individualmente resistir las fuerzas de compresión, doblado y torsión. Sin embargo, como los huesos del arco longitudinal están unidos unos a otros mediante ligamentos, tendones y músculos, el arco longitudinal funciona muy diferente a si el arco longitudinal estuviera constituido únicamente por elementos largos de hueso sólido sin articulaciones.

Las articulaciones del arco longitudinal permiten un movimiento necesario, mientras que a su vez también permiten estabilidad dependiendo de las demandas de carga de cada individuo. En otras palabras, con los huesos trabajando conjuntamente como un complejo de soporte de cargas compresivas, junto con sus ligamentos, tendones y músculos, el arco longitudinal tiene a su vez tanto una movilidad y

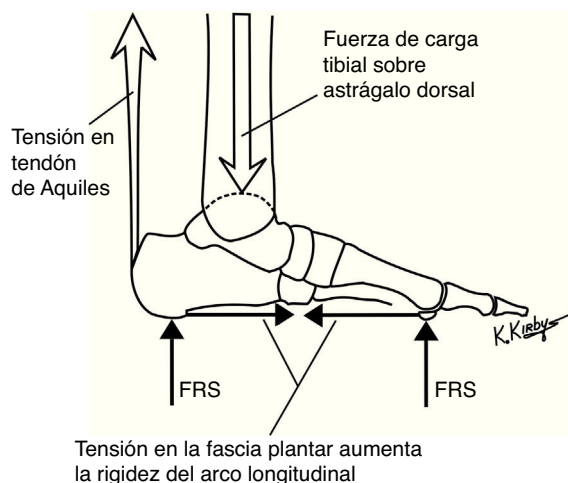


Figura 2 La fascia plantar es una estructura pasiva y forma la capa más superficial de los elementos de soporte de carga tensional del arco longitudinal en el sistema de reparto de cargas (SRCAL). Su expansión es desde el tubérculo medial del calcáneo hasta las bases digitales. La fascia plantar aumenta pasivamente su fuerza tensional cuando las FRS actúan sobre el antepié plantar, que aumenta la rigidez del arco longitudinal. El aumento de las FRS en el antepié plantar se asocia con un aumento de fuerza desde la tibia sobre la cúpula astragalina dorsal, y un aumento de la fuerza tensional en el tendón de Aquiles durante la marcha y la carrera.

una estabilidad suficientes como para permitir un funcionamiento óptimo para el individuo en respuesta a las diferentes magnitudes de cargas externas de las FRS que actúan en el aspecto plantar del pie durante las situaciones de carga.

Elementos de soporte de carga tensional en el sistema de reparto de cargas del arco longitudinal

A pesar de que cada hueso del arco longitudinal puede resistir cargas de compresión, doblado y torsión mejor que los ligamentos, músculos y tendones, los huesos del arco longitudinal funcionan como una unidad con su estructura de arco multisegmentado, y no pueden resistir un colapso total del arco sin los importantes elementos de soporte de carga tensional: la fascia plantar, los músculos plantares intrínsecos, los músculos plantares extrínsecos del arco longitudinal y los ligamentos plantares. Todas estas estructuras de soporte de carga tensional localizadas plantarmente son los 4 elementos que conforman el SRCAL, y que trabajan de forma sinérgica entre ellos para prevenir y regular el aplanamiento y la elongación del arco longitudinal del pie durante las situaciones de carga.

La capa más superficial de los elementos de soporte de carga tensional del SRCAL es la fascia plantar, también conocida como el componente central de la aponeurosis plantar (fig. 2). La fascia plantar se origina desde el aspecto más plantar del tubérculo medial del calcáneo como una banda relativamente gruesa que se adelgaza según se extiende distalmente para formar 5 bandas independientes que se insertan cada una en las bases de la falange proximal de

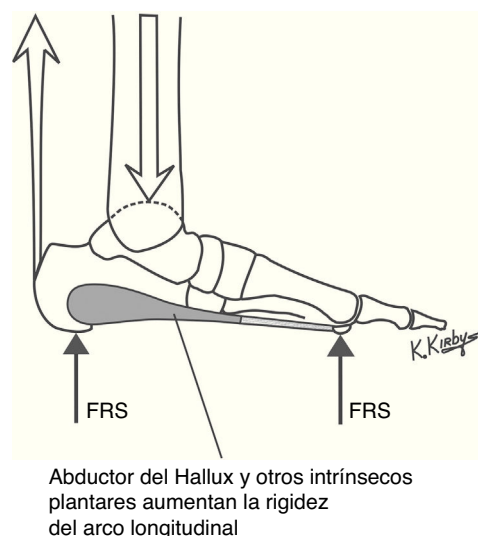


Figura 3 Los músculos plantares intrínsecos son activamente controlados por el sistema nervioso central y forman la capa de elementos de soporte de carga tensional del SRCAL, justo dorsal a la fascia plantar. El abductor del hallux y los otros músculos plantares intrínsecos se extienden a lo largo del arco longitudinal y sirven para volver rígido de forma activa el arco longitudinal cuando las FRS aumentan en el pie plantar, previniendo un aplanamiento excesivo del arco longitudinal durante las actividades de carga.

los 5 dedos¹⁶. La fascia plantar, como todas las estructuras fasciales y ligamentosas, es una estructura pasiva, independiente del sistema nervioso central (SNC) para aumentar sus fuerzas tensionales⁸.

Los trabajos de investigación clásicos de Hicks mostraron que al aumentar la fuerza tensional en la fascia plantar en condiciones de carga por medio de la dorsiflexión del hallux, el arco longitudinal aumentaba en lo que él llamó el «efecto Windlass», tanto en pies vivos como en cadáveres¹⁷. La fascia plantar está sometida a fuertes fuerzas tensionales que han sido estimadas en 0,96 el peso corporal en experimentos de simulación de marcha usando piernas y pies de cadáveres¹⁸. Otros investigadores han encontrado que posterior a la sección de la fascia plantar, el arco longitudinal del pie se aplanaba y se alargaba de forma significativa^{19,20}. Además, la fascia plantar se ha mostrado como un elemento de naturaleza elástica²¹ y, cuando se secciona, el arco longitudinal del pie se vuelve menos rígido (más propenso a aplanarse con la carga plantar en el pie de las FRS)²².

Justo más profundo a la fascia plantar se encuentra la siguiente capa de los elementos de soporte de carga tensional del SRCAL, los músculos plantares intrínsecos (fig. 3). El abductor del hallux (AH), flexor corto de los dedos (FDC), abductor del quinto dedo (QP) y cuadrado plantar (CP) son los músculos plantares intrínsecos más importantes en prevenir un aplanamiento y elongación excesivas del arco longitudinal con los otros músculos intrínsecos, teniendo un papel menos importante en este cometido²³.

La excelente investigación reciente sobre la función de los músculos intrínsecos plantares por Luke Kelly et al., usando electromiografía con aguja fina bipolar insertada en el AH, FDC y QP mostró que los músculos plantares

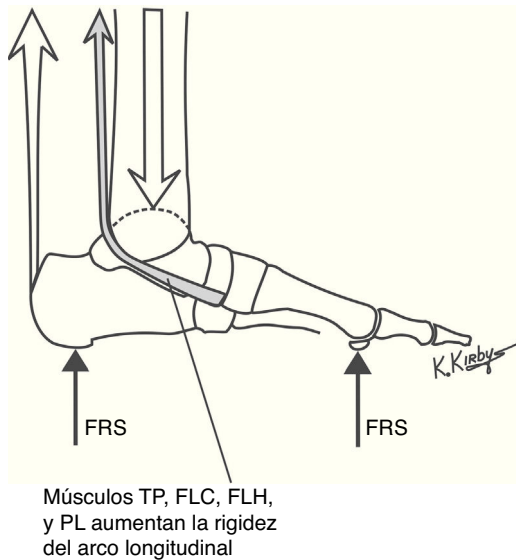


Figura 4 El músculo tibial posterior, flexor largo común, flexor largo del dedo gordo y peroneo largo son controlados de forma activa por el SNC y forman la capa del SRCAL entre los músculos plantares intrínsecos y los ligamentos plantares. El músculo tibial posterior, dibujado arriba, junto con el flexor largo común, flexor largo del dedo gordo y peroneo largo causan un momento plantarflexor del antepié con su actividad contráctil, que aumenta la rigidez del arco longitudinal, y también actúan para decelerar el aplanamiento del arco longitudinal y/o acelerar la elevación del arco longitudinal durante la marcha.

intrínsecos se activan por el SNC para ayudar a aumentar la rigidez del arco longitudinal del pie, ayudando tanto en el balance unipodal como bipodal²⁴. Con aumento de la carga en el arco longitudinal, el SNC aumenta la actividad contráctil de los intrínsecos plantares, y con la estimulación eléctrica de estos músculos, los plantares intrínsecos tienen la habilidad de elevar el arco longitudinal²⁵. La actividad electromiográfica de los plantares intrínsecos también ha mostrado que aumenta durante la fase de apoyo de la marcha y la carrera con mayor actividad, ocurriendo durante la carrera rápida que durante la marcha²⁶.

Profundos a los músculos plantares intrínsecos se encuentran los músculos extrínsecos del arco longitudinal plantar que conforman la siguiente capa de los elementos de soporte de carga tensional del SRCAL: el músculo tibial posterior (TP), flexor largo común (FLC), flexor largo del dedo gordo (FLDG) y peroneo largo (PL). El músculo TP, con su tendón insertándose en la tuberosidad del escafoides y también en el aspecto plantar de las cuñas, cuboideas y bases metatarsales, aporta una estabilidad activa al arco longitudinal al ejercer un momento plantarflexor del antepié con su actividad contráctil (una fuerza rotacional que resiste el aplanamiento del arco longitudinal) (fig. 4). El FLC, con sus inserciones en las falanges distales de los dedos menores, y el FLDG, con su inserción en la falange distal del hallux, ambos cruzan prácticamente toda la longitud del arco longitudinal plantar. Con la actividad contráctil del FLD y FLDG se genera un momento plantarflexor del antepié debido a un aumento de las fuerzas compresivas en las articulaciones metatarsofalángicas en dirección proximal ejercidas por las bases de las falanges proximales. El músculo PL y su tendón,

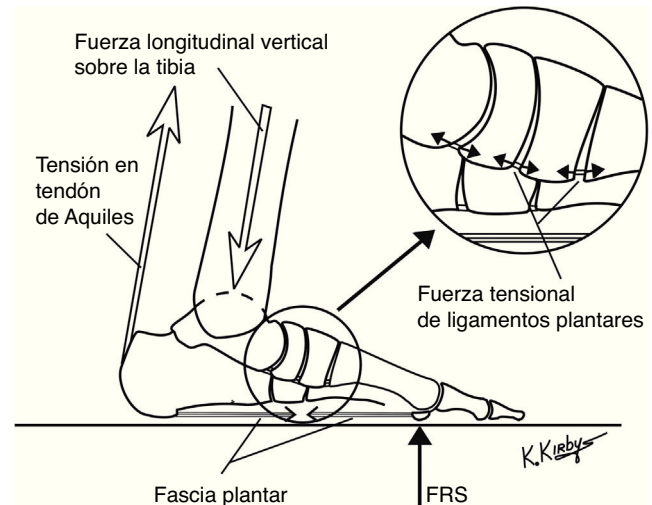


Figura 5 Los ligamentos plantares son los elementos de soporte de carga tensional que forman la capa más profunda del SRCAL. Cuando las cargas de las FRS aumentan el arco longitudinal se aplanan, lo que aumenta las fuerzas de tensión en los ligamentos plantares. Los ligamentos plantares y la fascia plantar trabajan de forma conjunta, sin control directo del SNC, para aumentar la rigidez del arco longitudinal cuando la posición de aplanamiento del arco longitudinal aumenta su fuerza tensional pasiva. Junto con las estructuras activamente controladas de la de la musculatura intrínseca y extrínseca, las 4 capas de elementos de soporte de carga tensional del SRCAL trabajan de forma sinérgica y conjunta para regular la rigidez del arco longitudinal durante las actividades de carga.

que entran lateralmente en el mediopié plantar y posteriormente cruzan el arco longitudinal para insertarse en la base del primer metatarsiano, generan un momento plantarflexor del primer radio y un momento plantarflexor del antepié durante su actividad contráctil.

Como ocurre con los músculos plantares intrínsecos el TP, FLC, FLDG y PL son músculos activamente controlados por el SNC, que permite al cuerpo regular la rigidez tanto del arco longitudinal interno como externo, dependiendo del tipo e intensidad de actividad en carga llevada a cabo por el individuo⁸. Al igual que la suspensión trasera del camión que tiene un microprocesador, o un control manual de sus amortiguadores o de su suspensión para permitir una rigidez de la suspensión posterior variable y una amortiguación de la aceleración vertical igualmente variable para las diferentes condiciones de conducción y cargas del vehículo, el SNC puede alterar las magnitudes y los patrones temporales de la actividad motora eferente para cualquiera o para todos los músculos plantares intrínsecos y plantares extrínsecos, optimizando así la rigidez y la capacidad de amortiguación de la aceleración vertical del arco longitudinal medial y lateral del pie para cualquier actividad en carga.

La capa más profunda de los elementos de soporte de carga tensional del SRCAL, los ligamentos plantares, son, al igual que la fascia plantar, estructuras pasivas que únicamente generarán fuerzas tensionales en sus fibras cuando estas se elongan (fig. 5). En situaciones de carga el antepié se dorsiflexiona sobre el retropié, originando un aplanamiento y alargamiento del arco longitudinal interno que

causa que todos los ligamentos plantares y la fascia plantar se elongen y generen un aumento de fuerza tensional en los elementos óseos del arco longitudinal sobre los que se insertan.

El aumento de la tensión en los ligamentos plantares que se observa con el movimiento de aplanamiento del arco longitudinal ayuda a aumentar la rigidez del arco longitudinal, ya que ambas capas de estructuras pasivas del SRCAL, la fascia plantar y los ligamentos plantares trabajan de forma sinérgica para aumentar la rigidez del arco longitudinal. En los 11 pies de cadáveres en los que se cargó con 920 Newtons de fuerza en su investigación, Crary et al. encontraron que la deformidad media del ligamento de *spring* aumentó un 52% y la deformidad media del ligamento plantar largo aumentó un 94% después de una fasciotomía²⁷. En otras palabras, con la fasciotomía plantar, el arco longitudinal se aplanó y se alarga con un aumento de la deformidad tanto del ligamento de *spring* como del ligamento plantar largo, indicando que estas estructuras pasivas del soporte de cargas tensional del SRCAL trabajan de forma conjunta para prevenir el aplanamiento del arco longitudinal.

Sinergias funcionales del sistema de reparto de cargas del arco longitudinal

Durante las actividades de carga el arco longitudinal debe aplanarse levemente para ayudar a amortiguar o atenuar las fuerzas de impacto provenientes de las FRS que actúan en la planta del pie. El arco longitudinal interno y externo necesitan también, por otro lado, cambiar de forma para poder adaptarse a las irregularidades del terreno. A su vez, el arco longitudinal debe ser suficientemente rígido para que las fuerzas musculares de los músculos gastrocnemio y sóleo se puedan transmitir de forma eficaz a lo largo del pie, llegando hasta la zona plantar del antepié para convertirse en una fuerza propulsiva mecánicamente efectiva durante la marcha, la carrera, el salto y otras actividades de carga. Alteraciones en la rigidez del arco longitudinal deben de ser reguladas por el SNC de forma continua para optimizar la localización y la magnitud de las cargas plantares que actúan sobre el pie, de tal forma que el pie pueda funcionar como un órgano de carga más eficaz durante las actividades en bipedestación⁸.

Para poder llevar a cabo la función biomecánica de ser suficientemente flexible como para permitir deformación durante la primera mitad de la fase de apoyo y, a la vez, ser suficientemente rígido como para permitir una propulsión eficaz durante la segunda mitad de la fase de apoyo; el SRCAL usa los elementos pasivos de la fascia plantar y los ligamentos plantares junto con elementos de control activo de la musculatura plantar intrínseca y plantar extrínseca para regular de forma continua la rigidez del arco longitudinal del pie. En otras palabras, las 4 capas descritas del SRCAL trabajan de forma sinérgica, tanto activa como pasivamente, para formar un sistema de reparto de cargas que mantiene la integridad y optimiza la función del arco longitudinal del pie durante las actividades de carga⁸.

Una característica mecánica clave de cada uno de los 4 elementos de soporte de carga tensional del SRCAL es que cada uno trabaja para realizar las mismas funciones en el arco longitudinal interno del pie, de tal forma que cuando

un elemento falla, los elementos restantes todavía permiten un funcionamiento apropiado de la función del arco longitudinal interno. Sin embargo, esto también significa que cuando una de las estructuras del SRCAL falla (por ejemplo por rotura de la fascia plantar o de los ligamentos plantares), las otras estructuras de soporte de carga tensional estarán sometidas a un aumento de las cargas tensionales para permitir una función correcta del arco longitudinal (fig. 6). Por lo tanto, los 4 elementos de soporte de carga tensional del SRCAL trabajan no solo para reducir la tensión de la carga en todos los elementos del SRCAL, si no que a su vez garantizan que cuando un elemento falle, el arco longitudinal tendrá suficiente fuerza y rigidez como para mantener su forma y función de manera apropiada durante las actividades de carga⁸.

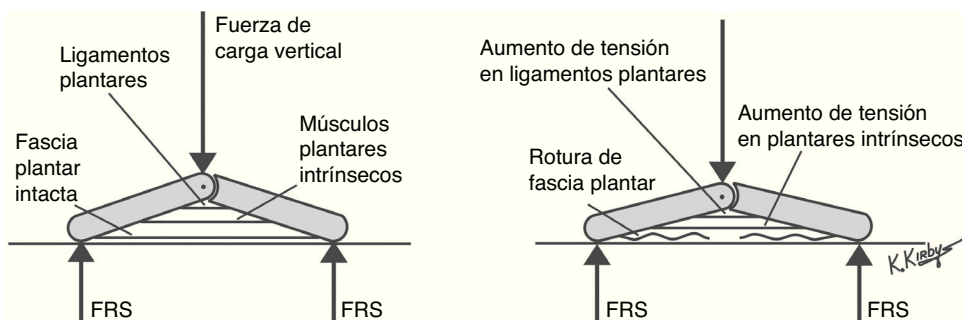
Control pasivo del sistema de reparto de cargas del arco longitudinal

Uno de los factores del diseño más significativos del SRCAL es la integración mecánica de los elementos pasivos, la fascia plantar y los ligamentos plantares, junto con los elementos controlados por el SNC (los músculos plantares intrínsecos y músculos plantares extrínsecos del pie). Como se ha señalado anteriormente, ya que las fuerzas de tensión en la fascia plantar y en los ligamentos plantares no están directamente controladas por el SNC, la fascia plantar y los ligamentos plantares solo pueden realizar fuerzas tensionales en sus orígenes e inserciones cuando el antepié se dorsiflexiona sobre el retropié o, en otras palabras, cuando el arco longitudinal se aplanó y se alarga.

Por ejemplo, en actividades de descarga (por ejemplo sentado o tumbado), ya que el antepié se encuentra relativamente plantarflexionado sobre el retropié, la fascia plantar y los ligamentos plantares ejercen una fuerza tensional insignificante en los elementos óseos del arco longitudinal. La plantarflexión pasiva del antepié relativa al retropié durante las situaciones de descarga acorta la distancia entre los orígenes e inserciones de la fascia plantar y de los ligamentos plantares, de forma que estos elementos de soporte de carga tensional no están elongados y, de esta forma, tienen fuerzas tensionales insignificantes durante estas actividades de descarga.

Sin embargo, cuando las FRS actúan en el antepié plantar, o si los dorsiflexores de la articulación del tobillo ejercen una fuerza contráctil sobre el antepié, se crea un momento dorsiflexor del antepié que tiende a hacer dorsiflexión del antepié sobre el retropié. Este momento dorsiflexor del antepié producirá aplanamiento y alargamiento del arco longitudinal, que, a su vez, elongará la fascia plantar y los ligamentos plantares hasta que estos realicen cierta cantidad de fuerza tensional. Una vez que la fuerza tensional en la fascia plantar y los ligamentos plantares causan suficientes momentos internos plantarflexores del antepié para contrarrestar los momentos dorsiflexores del antepié, entonces el aplanamiento y la elongación del arco longitudinal frenarán y el arco longitudinal se volverá estable.

Siguiendo en esta línea, cualquier fuerza dorsiflexora actuando en el antepié, tanto de las FRS y/o de la actividad muscular contráctil, también causará un momento dorsiflexor en el tobillo de forma simultánea que pondrá el tendón



Sistema de reparto de cargas del arco longitudinal del pie

Figura 6 En este modelo simplificado del arco longitudinal del pie se muestran 3 de las 4 capas de los elementos de soporte de carga tensional del SRCAL de superficial a profundo: la fascia plantar, los músculos plantares intrínsecos y los ligamentos plantares. Cuando las fuerzas de carga vertical se aplican en el aspecto dorsal de arco longitudinal y las FRS aumentan en la zona plantar del retropié y del antepié, el arco longitudinal comienza a aplanarse, lo que pasivamente aumenta la tensión en la fascia plantar y en los ligamentos plantares. El SNC responderá a dicho aplanamiento aumentando la actividad contráctil de los músculos plantares intrínsecos (izquierda). Con una rotura de la fascia plantar, la pérdida de fuerza tensional plantar de este elemento causará aplanamiento del arco longitudinal (derecha). El aumento de aplanamiento del arco longitudinal aumentará de forma pasiva la tensión en los ligamentos plantares y también producirá un aumento de las señales eferentes del SNC hacia los músculos plantares intrínsecos. El SNC puede responder también aumentando la actividad contráctil de los músculos extrínsecos del arco longitudinal plantar (los músculos extrínsecos no aparecen ilustrados en esta figura). De esta forma, la disposición única del sistema de reparto de cargas de los elementos de soporte de carga tensional del SCRAL permitirán una función apropiada del arco longitudinal, a pesar de que uno de sus elementos haya dejado de funcionar.

de Aquiles y el músculo gastrocnemio y sóleo bajo fuerzas tensionales aumentadas. En otras palabras, cuando las FRS aumentan sobre la zona plantar del antepié, las fuerzas tensionales en la fascia plantar, los ligamentos plantares aumentan, y cuando el tobillo se dorsiflexiona las fuerzas tensionales en el tendón de Aquiles también aumentan. Igualmente, cuando las FRS disminuyen en la zona plantar del antepié la tensión en la fascia plantar, los ligamentos plantares y el tendón de Aquiles disminuye¹².

Por lo tanto, las fuerzas tensionales en el tendón de Aquiles, en la fascia plantar y en los ligamentos plantares están mecánicamente conectadas de tal forma que cuando el antepié se dorsiflexiona sobre el retropié durante las actividades de carga la fascia plantar, los ligamentos plantares y el tendón de Aquiles se elongarán y experimentarán un aumento de fuerza tensional pasiva²⁸. El efecto mecánico directo de este aumento de fuerza tensional en la fascia plantar y los ligamentos plantares es que el arco longitudinal se vuelve, de forma pasiva y automática, más rígido durante la marcha y la carrera para ayudar a limitar el aplanamiento y la elongación del arco longitudinal durante el apoyo medio y la propulsión⁸.

Según las FRS aumentan en la zona plantar del antepié, la rigidez del arco longitudinal aumenta hasta que alcanza suficiente magnitud como para prevenir mayor dorsiflexión del antepié sobre el retropié (aplanamiento del arco longitudinal). Una vez que el arco longitudinal se vuelve suficientemente rígido, entonces las fuerzas tensionales del tendón de Aquiles pueden aumentar las FRS en la zona plantar del antepié de forma más eficaz durante actividades propulsivas. De esta forma, el aumento de la rigidez de las articulaciones mediotarsiana y del mediopié que ocurren por el aumento de fuerzas tensionales en la fascia plantar y los ligamentos plantares, hacen de las actividades de andar,

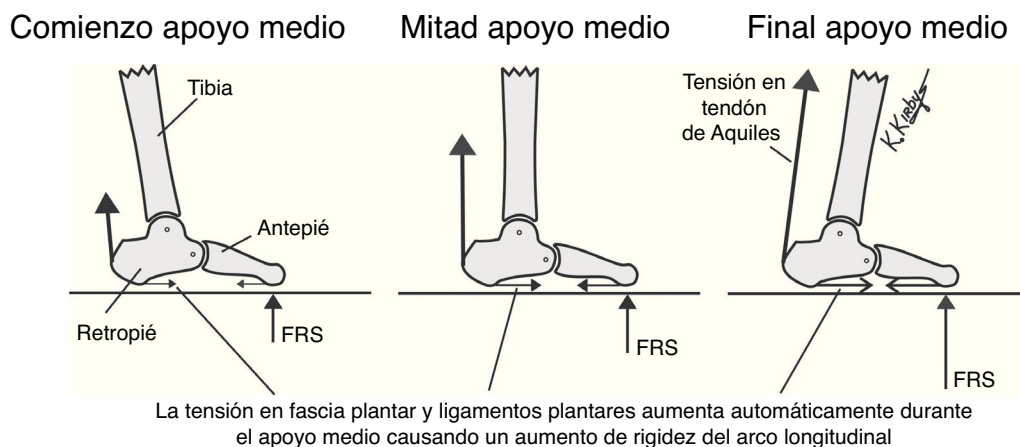
correr y saltar actividades más económicamente eficaces desde el punto de vista metabólico.

Mecanismo de autorrigidez del arco longitudinal

En 1993 Dananberg señaló 3 diferentes mecanismos de «autosuporte», que son el «bloqueo» de la articulación calcaneocuboidea secundario a un «tensionamiento» de la fascia plantar, el «efecto de bloqueo de cuña y cercha» y el mecanismo de Windlass, que se pensaba que permitían al pie soportar el estrés que se le aplica cuando caminamos²⁹. Más recientemente, en 2012, Kirby señaló otra función automática del pie: el mecanismo de autorrigidez del arco longitudinal³⁰, que permite aumentar la rigidez de forma automática del arco longitudinal cuando el pie progresa desde el comienzo al final del apoyo medio durante la marcha (fig. 7).

El mecanismo de auto-rigidez del arco longitudinal es directamente debido a: 1) la estructura arqueada única de los elementos óseos del arco longitudinal; 2) la localización posterior de la inserción del tendón de Aquiles que causa no solo un momento plantarflexor de la articulación del tobillo, sino también un momento plantarflexor del retropié que tiende a aplanar el arco longitudinal; y 3) las localizaciones plantares de la fascia plantar y de los ligamentos plantares, que extienden el arco longitudinal y resisten pasivamente el aplanamiento del arco longitudinal según las FRS aumentan en la zona plantar del antepié durante el apoyo medio³⁰.

Como resultado de esta configuración morfológica de los huesos, músculos y ligamentos del pie y la pierna humanos el aumento automático de la tensión en la fascia plantar y los ligamentos plantares, que mecánicamente resultan debido



Mecanismo de autorrigidez del arco longitudinal del pie

Figura 7 El mecanismo de autorrigidez del arco longitudinal depende de la disposición anatómica única del tendón de Aquiles, la fascia plantar y los ligamentos plantares en el pie humano. Al comienzo del apoyo medio, las FRS plantares al antepié y la fuerza tensional del tendón de Aquiles son relativamente de pequeña magnitud, lo que causa una cantidad relativamente pequeña de tensión en la fascia plantar y en los ligamentos plantares, que produce poco aumento de la rigidez del arco longitudinal (izquierda). A la mitad del apoyo medio, la fuerza en el tendón de Aquiles y las FRS en la zona plantar del antepié aumentan, el arco longitudinal automáticamente se vuelve rígido debido al aumento de fuerza tensional pasiva en la fascia plantar y los ligamentos plantares (centro). Justo antes del levantamiento de talón, cuando la tensión en el tendón de Aquiles y las FRS en la zona plantar del antepié son máximas, la rigidez del arco longitudinal también automáticamente aumenta en magnitud debido al aumento de las fuerzas de tensión en la fascia plantar y en los ligamentos plantares (derecha). El mecanismo de autorrigidez del arco longitudinal disminuye enormemente las demandas metabólicas en las actividades de la marcha y carrera, ya que el aumento automático en la rigidez del arco longitudinal al comienzo de la propulsión permite que la potencia generada por los músculos gastrocnemio y sóleo sea transferida más eficazmente al antepié plantar a través del tendón de Aquiles. Como resultado, el mecanismo de autorrigidez del arco longitudinal resulta en un menor movimiento de aplanamiento del arco longitudinal durante el apoyo medio y propulsión, lo que mejora la eficiencia mecánica de la marcha.

a un aumento de fuerza tensional en el tendón de Aquiles, también aumentan de forma automática la rigidez del arco longitudinal según el apoyo medio progresa, lo que probablemente reduce el coste metabólico de andar y correr. De forma más importante, estas acciones mecánicamente unidas de forma automática, que aumentan la rigidez del arco longitudinal cuando el apoyo medio progresa, no requieren el control directo del SNC. En otras palabras, incluso en un pie de cadáver sin actividad muscular y sin control del SNC se demuestra un mecanismo de rigidez «automático» siempre y cuando la fuerza tensional del tendón de Aquiles aumente y las FRS en la zona plantar del antepié también aumenten en respuesta al incremento de fuerza tensional en el tendón de Aquiles. Por lo tanto, el mecanismo de autorrigidez del arco longitudinal es un mecanismo totalmente pasivo en el pie que no requiere coste de energía metabólica para la función de aumentar la rigidez del arco longitudinal, y solo requiere generación de fuerza tensional en el tendón de Aquiles para resistir los momentos dorsiflexores externos en la articulación del tobillo causados por las FRS que actúan en la zona plantar del antepié³⁰.

Control activo del sistema de reparto de cargas del arco longitudinal

Los músculos plantares intrínsecos y los músculos TP, FLC, FLDG y PL controlados por el SNC funcionan conjuntamente

como elementos activos del SRCAL que permiten al pie ser un órgano dinámico en las actividades de carga. Estos elementos del sistema de soporte de cargas tensionales del SRCAL pueden ajustar la rigidez del arco longitudinal medial y/o lateral, de tal forma que las magnitudes y la localización plantar de las FRS se pueden alterar en cualquier momento durante la marcha. El SNC puede modular la rigidez del arco longitudinal aumentando o disminuyendo la actividad contráctil con diferentes combinaciones de los músculos plantares intrínsecos y de los músculos TP, FLC, FLDG y PL que pueden hacer, según se necesite, que el arco longitudinal medial y lateral se comporte como un muelle más rígido o como un muelle más flexible durante las actividades de carga⁸.

Por ejemplo, situaciones que requieren que el pie se adapte a superficies irregulares, o que requieren que el antepié se mantenga plantigrado en un movimiento rápido de lado-a-lado, puede requerir que el SNC simultáneamente reduzca la señales motoras eferentes para disminuir la rigidez del arco longitudinal medial y aumentar las fuerzas motoras eferentes para aumentar la rigidez del arco longitudinal lateral. Así como los microprocesadores que controlan los amortiguadores en un vehículo con un sistema de suspensión trasera pueden aumentar o disminuir su rigidez para optimizar la comodidad y la eficiencia y seguridad sobre diferentes superficies y fuerzas de carga durante la conducción, el SNC controla las actividades contráctiles de los músculos plantares intrínsecos y los músculos plantares

extrínsecos, y regula de forma fina el SRCAL para el individuo, de tal forma que sus actividades de carga se puedan realizar de forma suave, eficaz y con un riesgo de lesión más reducido⁸.

Conclusión

Como Leonardo Da Vinci señaló hace 6 siglos, el pie humano es una obra maestra de ingeniería y una pieza de arte. Una de estas maravillas de ingeniería del pie humano es el arco longitudinal y su elegante y único sistema de reparto de cargas: el SRCAL. Con sus elementos pasivos que automáticamente aumentan la rigidez del arco longitudinal, con aumento de la tensión en el tendón de Aquiles y aumento de las cargas en el antepié plantar, y sus elementos activos, que permiten que el SNC pueda modificar de forma instantánea su rigidez y las localizaciones plantares y magnitudes de las FRS que actúan sobre el pie plantar, el SRCAL permite realizar actividades de carga de forma más eficaz y eficiente metabólicamente. EL SRCAL permite al pie humano funcionar como un muelle con rigidez variable controlado de forma activa, con el SNC continuamente optimizando la rigidez de ambos, el arco longitudinal medial y lateral para mejorar la función biomecánica del individuo en carga. El podólogo y todos los profesionales que se dediquen al pie deben de ser plenamente conscientes de estos mecanismos sinérgicos en el arco longitudinal para entender mejor la función normal del pie y de la extremidad inferior, y permitir así elegir el tratamiento quirúrgico y conservador más eficaz para aquellos pacientes con enfermedades de origen mecánico del pie y del miembro inferior.

Bibliografía

- Valderrabano V, Easley M, editores. *Foot and ankle sports orthopaedics*. New York: Springer; 2016.
- Da Vinci L. En: Suh HA, editor. *Leonardo's Notebooks: Writing and art of the great master*. New York: Black Dog & Leventhal; 2013.
- Whitman R. A study of the weak foot, with reference to its causes, its diagnosis, and its cure; with an analysis of a thousand cases of so-called flat-foot. *J BJS*. 1986;8:42-77.
- Whitman Royal, editor. *A treatise on orthopaedic surgery*. 6th ed. Philadelphia: Lea & Febiger; 1919.
- Smith TF, Green DR: *Pes cavus*. En: Banks AS, Downey MS, Martin DE, Miller SJ, editors. *McGlamry's comprehensive textbook of foot and ankle surgery*, Vol. 1, 3rd ed Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins; 2001. p. 761-98.
- Parkin A. The causation and mode of production of pes cavus. *Medico-chirurgical transactions*. 1891;74:485-95.
- Mahan KT, Flanigan KP. Pathologic pes valgus disorders. En: Banks AS, Downey MS, Martin DE, Miller SJ, editors. *McGlamry's comprehensive textbook of foot and ankle surgery*, Vol. 1, 3rd ed Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins; 2001. p. 799-899.
- Kirby KA. *Foot and lower extremity biomechanics IV: Precision intracast newsletters*, 2009-2013. Payson, AZ: Precision Intracast, Inc; 2014. p. 31-4.
- Ye Z, Revie M, Walls L. A load sharing system reliability model with managed component degradation. *IEEE transactions on reliability*. 2014;63:721-30.
- Taghipour S, Kassaei ML. Periodic inspection optimization of a k-out-of-n load-sharing system. *IEEE transactions on reliability*. 2015;64:1116-27.
- Warczek J, Burdzik R, Peruń G. The method for identification of damping coefficient of the trucks suspension. *Key Engineering Materials*. 2014;588:281-9.
- Sun S, Deng H, Du H, Li W, Yang J, Liu G, et al. A compact variable stiffness and damping shock absorber for vehicle suspension. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015;20:2621-9.
- Keller TS, Weisberger AM, Ray JL, Hasan SS, Shiavi RG, Spengler DM. Relationship between vertical ground reaction force and speed during walking, slow jogging, and running. *Clin Biomech*. 1996;11:253-9.
- McNair PJ, Prapavessis H. Normative data of vertical ground reaction forces during landing from a jump. *J Scie & Med Sport*. 1999;2:86-8.
- Bronner F, Farach-Carson MC, Roach HI, editores. *Bone and development*. New York: Springer; 2010.
- Sarraffian SK, Kellikian AS. *Retaining systems and compartments*. En: Kellikian AS, Sarraffian SK, editores. *Sarraffian's anatomy of the foot and ankle: Descriptive, topographic, functional*. 3rd ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins; 2011. p. 120-62.
- Hicks JH. The mechanics of the foot. II. The plantar aponeurosis and the arch. *J Anatomy*. 1954;88:24-31.
- Erdemir A, Hamel AJ, Fauth AR, Piazza SJ, Sharkey NA. Dynamic loading of the plantar aponeurosis in walking. *J BJS*. 2004;86A:546-52.
- Sharkey NA, Ferris L, Donahue SW. Biomechanical consequences of plantar fascial release or rupture during gait: Part I-Disruptions in longitudinal arch conformation. *Foot Ankle Int*. 1998;19:812-20.
- Murphy GA, Pneumaticos SG, Kamaric E, Noble PC, Trevino SG, Baxter DE. Biomechanical consequences of sequential plantar fascia release. *Foot Ankle Int*. 1998;19:149-52.
- Wright DG, Rennels DC. A study of the elastic properties of plantar fascia. *J BJS*. 1964;46:482-92.
- Ker RF, Bennett MB, Bibby SR, Kester RC, Alexander RM. The spring in the arch of the human foot. *Nature*. 1987;325:147-9.
- Sarraffian SK, Kellikian AS. *Miology*. En: Kellikian AS, Sarraffian SK, editores. *Sarraffian's anatomy of the foot and ankle: Descriptive, topographic, functional*. 3rd ed Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins; 2011. p. 223-91.
- Kelly LA, Kuitunen S, Racinais S, Cresswell AG. Recruitment of the plantar intrinsic foot muscles with increasing postural demand. *Clin Biomech*. 2012;27:46-51.
- Kelly LA, Cresswell AG, Racinais S, Whiteley R, Lickwark G. Intrinsic foot muscles have the capacity to control deformation of the longitudinal arch. *J R Soc Interface*. 2014;11:20131188.
- Kelly LA, Lichtwark G, Cresswell AG. Active regulation of longitudinal arch compression and recoil during walking and running. *J R Soc Interface*. 2015;12:20141076.
- Crary JL, Hollis M, Manoli A. The effect of plantar fascia release on strain in spring and long plantar ligaments. *Foot Ankle*. 2003;24:245-50.
- Carlson RE, Fleming LL, Hutton WC. The biomechanical relationship between the tendoachilles, plantar fascia and metatarsophalangeal joint dorsiflexion angle. *Foot Ankle Int*. 2000;21:18-25.
- Dananberg HJ. Gait style as an etiology to chronic postural pain. Part I. Functional hallux limitus. *J Am Podiatr Med Assoc*. 1993;83:433-41.
- Kirby KA. *Foot and lower extremity biomechanics IV: Precision intracast newsletters*, 2009-2013. Payson, AZ: Precision Intracast, Inc; 2014. p. 35-6.