



REVISTA ESPAÑOLA DE PODOLOGÍA

Publicación Oficial del Consejo General de Colegios Oficiales de Podólogos

Artículo Aceptado para su pre-publicación / Article Accepted for pre-publication

Título / Title:

Anatomía y sonopatología de la placa plantar metatarsofalángica / Anatomy and sonopathology of the metatarsophalangeal plantar plate

Autores / Authors:

Javier Alcalá Sanz, Ana Isabel Marcos Casado, Jordi Sánchez Mercè, Bernat Cabestany Perich, Pedro Nogales Gómez

DOI: [10.20986/revesppod.2024.1693/2024](https://doi.org/10.20986/revesppod.2024.1693/2024)

Instrucciones de citación para el artículo / Citation instructions for the article:

Alcalá Sanz Javier, Marcos Casado Ana Isabel, Sánchez Mercè Jordi, Cabestany Perich Bernat, Nogales Gómez Pedro. Anatomía y sonopatología de la placa plantar metatarsofalángica / Anatomy and sonopathology of the metatarsophalangeal plantar plate. Rev. Esp. Pod. 2024. doi: 10.20986/revesppod.2024.1693/2024.



Este es un archivo PDF de un manuscrito inédito que ha sido aceptado para su publicación en la Revista Española de Podología. Como un servicio a nuestros clientes estamos proporcionando esta primera versión del manuscrito en estado de pre-publicación. El manuscrito será sometido a la corrección de estilo final, composición y revisión de la prueba resultante antes de que se publique en su forma final. Tenga en cuenta que durante el proceso de producción se pueden dar errores lo que podría afectar el contenido final.



REVISIÓN

Artículo bilingüe español / inglés

Rev Esp Podol. 2024;xx(x):xx-xx

DOI: <http://dx.doi.org/10.20986/revespod.2024.1693/2024>

Anatomía y sonopatología de la placa plantar metatarsofalángica

Anatomy and sonopathology of the metatarsophalangeal plantar plate

Javier Alcalá Sanz¹, Ana Isabel Marcos Casado¹, Jordi Sánchez Mercè², Bernat Cabestany Perich³ y Pedro Nogales Gómez⁴

¹Clínica del Pie Alcalá. Bormujos, Sevilla, España. ²Clínica del Peu Maresme. Mataró, Barcelona, España. ³Clínica Novamedicum. Sabadell, Barcelona, España. ⁴Clínica Podoactiva Málaga, España

Palabras clave:

Placa plantar, plato flexor, anatomía del antepié, metatarsalgia, síndrome de predislocación metatarsofalángica, dedo en garra, ecografía del antepié.

Resumen

La placa plantar de las articulaciones metatarsofalángicas menores juega un papel fundamental en la estabilidad digital, manteniendo la correcta alineación del dedo con su metatarsiano y actuando asimismo de punto de anclaje para el resto de estructuras estabilizadoras de dicha articulación. La lesión de este ligamento especializado precipita la deformidad de los dedos menores, en especial el segundo, y es un motivo de consulta habitual en la clínica podológica. En el presente artículo realizamos una revisión pormenorizada de sus características anatómicas e histológicas, sus funciones mecánicas y mecanismos lesionales, así como su exploración clínica y mediante pruebas de imagen, dedicando un apartado especial a la ecografía que se ha erigido en la última década como un recurso accesible y cada vez más habitual en las consultas de podología. Gracias al uso de esta técnica podemos realizar un diagnóstico económico, en tiempo real, dinámico y más preciso del tipo de lesión que se presenta en la placa plantar o en los tejidos adyacentes, desde pequeñas distensiones hasta roturas parciales o completas acompañadas de un mayor o menor daño óseo e inflamación en los tejidos blandos periféricos, como la grasa plantar o los tendones flexores. La caracterización de las lesiones permite correlacionar mucho mejor la etiología con la lesión, así como establecer la mayor o menor necesidad de tratamiento y un pronóstico más certero para cada paciente.

Keywords:

Plantar plate, flexor plate, forefoot anatomy, forefoot pain, metatarsophalangeal predislocation syndrome, claw toe, forefoot sonography.

Abstract

The plantar plate of the lesser metatarsophalangeal joints plays a fundamental role in digital stability, maintaining the correct alignment of the finger with its metatarsal and also acting as an anchor point of the rest of the articular stabilizing structures. Injury to this specialized ligament precipitates deformity of the lesser toes, especially the second, and is a common reason for consultation in the podiatry clinic. In this article we carry out a detailed review of its anatomical and histological characteristics, its mechanical functions and injury mechanisms as well as its clinical examination and through imaging tests, dedicating a special section to ultrasound, which has emerged in the last decade as an accessible resource and increasingly common in podiatry consultations. Thanks to the use of this technique we can make an economical, real-time, dynamic and more precise diagnosis of the type of injury that occurs in the plantar plate or in the adjacent tissues, from small strains to partial or complete tears accompanied by a greater or less bone damage and inflammation in peripheral soft tissues such as plantar fat pad or flexor tendons. The characterization of the lesions allows us to correlate the etiology with the lesion much better, as well as establish the greater or lesser need for treatment and a more accurate prognosis for each patient.

Recibido: 06-04-2024

Aceptado: 14-05-2024



0210-1238 © Los autores. 2024.
Editorial: INSPIRA NETWORK GROUP S.L.
Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC Reconocimiento 4.0 Internacional
(www.creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Correspondencia:

Javier Alcalá Sanz
javialcalasanz@gmail.com

Anatomía e histología de la placa plantar

La placa plantar (por ejemplo, plato flexor, plato glenoideo) de las articulaciones metatarsofalángicas menores juega un papel crucial en la estabilidad de los dedos, siendo la principal estructura anatómica, en sinergia con los ligamentos colaterales, que contrarresta las fuerzas de dorsiflexión de dichas articulaciones.

Se trata de una pequeña estructura muy especializada, fundamentalmente fibrocartilaginosa, que da continuidad a la zona terminal profunda de la fascia plantar y se ancla firmemente a la base de la falange proximal de los dedos (Figura 1), proporcionando asimismo una superficie de anclaje para otras estructuras ligamentosas y tendinosas y, en su cara plantar, como zona de paso para los tendones flexores. Dada su ubicación, características y función es comparada con los sesamoideos de la primera articulación metatarsofalángica^{1,2}.

A pesar de su pequeño tamaño es una estructura compleja, firme pero flexible, sirviendo de punto de anclaje de las estructuras anatómicas de su región, lo que da idea de su importancia en la estabilidad articular^{3,4}. Para comprender mejor su anatomía y función mecánica es útil estudiar de forma pormenorizada sus diferentes regiones, así como la variabilidad histológica de las mismas¹⁻⁴:

- **Características generales:** en su mayor parte la placa plantar es un tejido fibrocartilaginoso compuesto fundamentalmente de colágeno tipo 1 (similar al cartílago de la rodilla) y en menor medida tipo 2 (75 % vs. 21 %) sin fibras de elastina². Su grosor oscila de 2 a 5 mm (mayor en su zona central), con una anchura promedio de 10 mm y longitud promedio de 17-19 mm. En los 2/3 dorsales las fibras se orientan longitudinalmente mientras que en su 1/3 plantar lo hacen transversalmente en continuidad con el ligamento intermetatarsiano transversal profundo y ligamentos colaterales.
- **Unión proximal al metatarsiano:** en su zona proximal la placa plantar se une al cuello y cabeza metatarsal (justo proximal al cartílago articular) mediante un tejido delgado (0.4 mm), fibroso y de características sinoviales.

- **Anclaje distal a la base de la falange proximal:** su inserción a la zona plantar de la base de la falange proximal es fuerte y está compuesta de una mayor proporción de fibroblastos, constituyendo un tejido de características ligamentosas⁴. Todo el grosor de la estructura se inserta en el hueso mediante dos bandeletas reforzadas, medial y lateral, y en continuidad con el cartílago constituyendo un habitáculo cóncavo para la cabeza metatarsal. En su zona central puede existir un pequeño receso sinovial central que, en ocasiones, se confunde con patología en imágenes de resonancia magnética (pseudorotura de la placa plantar)⁵ (Figura 2).
- **Porción central (*midsubstance*):** de su porción central es conveniente distinguir entre sus 2/3 dorsales que están compuestos de un tejido fibrocartilaginoso con una proporción mayor de condrocitos constituyendo una carilla articular para la cabeza metatarsal con unas características similares al menisco de la rodilla^{4,5}. En su cara plantar forma una estructura acanalada de tejido fibroso y sinovial que sirve de nexo entre la placa y la vaina tendinosa de los flexores y permite el deslizamiento de estos.
- **Relaciones músculo-ligamentosas:** la placa plantar sirve de base para el anclaje de diferentes estructuras ligamentosas. En la descripción original de Kelikian y Sarrafian⁶ se describen dos trayectos ligamentosos colaterales (mediales y laterales) diferenciados en fibras metatarsofalángicas (que unen el epicóndilo metatarsal con la base de la falange) y fibras metatarso-glenoideas que conectan el epicóndilo de la cabeza metatarsal



Figura 1. Visión general de la placa plantar recubriendo la cabeza del cuarto metatarsiano (visión plantar). Al retraer la placa podemos observar su anclaje a la base de la falange y cómo da continuidad al cartílago de esta para acunar la cabeza metatarsal (visión dorsal).



Figura 2. Visión detallada del anclaje de la placa plantar a la base de la falange proximal mediante dos bandeletas o slips con receso sinovial central.

directamente con la placa. Ambos grupos de ligamentos son intracapsulares (Figura 3A). Recientemente se ha propuesto una nomenclatura distinta para estos ligamentos distinguiendo entre ligamentos colaterales propios y accesorios⁷.

Por otro lado, las placas plantares también actúan como nexo de unión de los diferentes trayectos del ligamento intermetatarsiano transverso profundo que se ancla a ambos lados del plato flexor en su porción más plantar dando consistencia a toda la estructura (Figura 3B).

Finalmente, tanto los tendones interóseos como los lumbricales pueden también lanzar expansiones que se continúan con la placa plantar^{2,5}.

- **Vascularización:** la vascularización de la placa ha sido también objeto de estudio de diferentes investigadores. Gregg y cols.⁴ estipularon que el aporte sanguíneo que recibe la placa es fundamentalmente a través de la zona periférica plantar. Más recientemente, Finney y cols.⁸ han elaborado varios trabajos mediante tomografía nano-computarizada concluyendo

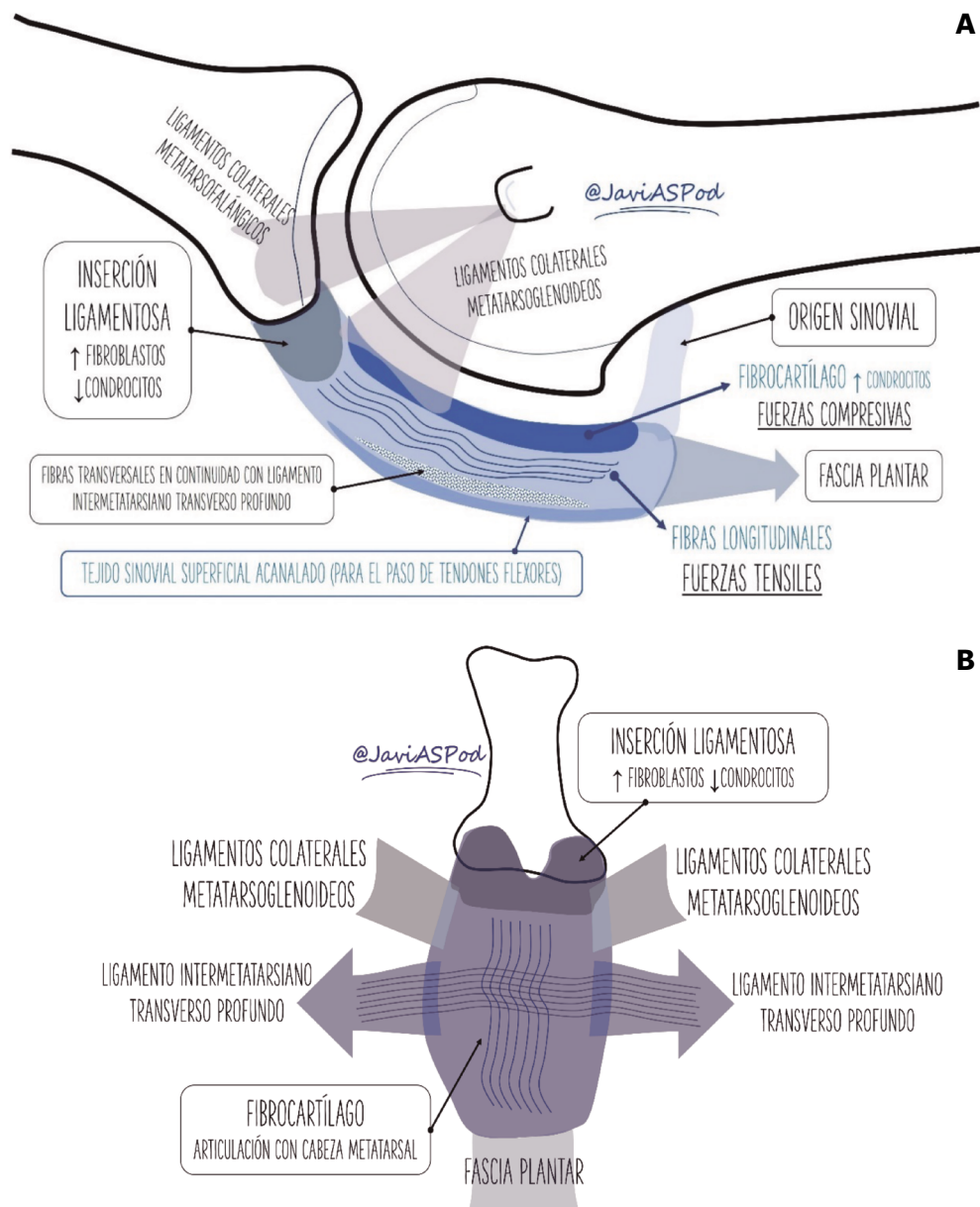


Figura 3. A (sagital) y B (transversa). Visión esquemática de la placa plantar, sagital y transversa, con detalles histológicos relevantes que explican su función mecánica. Las fibras de la placa discurren longitudinalmente salvo en su 1/3 plantar, donde lo hacen transversalmente en continuidad con el ligamento intermetatarsiano transverso profundo y los ligamentos colaterales. En su zona más distal la composición de la placa cambia “transformándose” en un tejido de características ligamentosas para anclarse a la falange proximal.

que la porción central de la placa podría ser una región hipovascularizada, lo que explicaría mayor tendencia a patología en dicha región, así como las dificultades observadas en el proceso de curación. En un artículo más reciente de este mismo equipo de investigadores, se señala que la unión sinovial proximal previamente descrita podría no ser simplemente un tejido de unión sino un pedículo a partir del cual en torno al 65 % de la región proximal de la placa se nutriese a través del cuello metatarsal, con importantes implicaciones en el manejo quirúrgico⁹.

Funciones mecánicas de la placa plantar

Analizada la anatomía y la composición tisular de la placa plantar podemos comprender mejor las funciones mecánicas que desempeña y que pasamos a enumerar a continuación:

- *Refuerzo plantar de la cápsula articular*: la cápsula articular metatarsofalángica, bien diferenciada en su aspecto dorsal se fusiona con la placa plantar en su aspecto plantar, constituyendo esta el “suelo” de dicha cápsula^{5,10}.
- *Estabilización estática de las articulaciones metatarsofalángicas menores*: como ya se ha mencionado, las placas plantares constituyen la región distal e insercional de la fascia plantar, lo que tiene importantes implicaciones biomecánicas a través del conocido como mecanismo de windlass inverso. Este mecanismo implica que las fuerzas de reacción del suelo que actúan sobre la cara plantar del pie tienden a aplanar el arco y aumentar la tensión de la fascia plantar, lo que da lugar a un momento plantarflexor de la falange proximal, donde se inserta a través de la placa, actuando como un estabilizador pasivo de los dedos en el suelo durante las actividades de carga. Este efecto no está mediado por ninguna actividad muscular (ni, por ende, el SNC), sino que es directamente producido por la disposición y características de la fascia plantar y su inserción en las bases de las falanges proximales. Por esta razón las placas plantares, a través del mecanismo de Windlass inverso, son los principales estabilizadores pasivos de los dedos para permitir el agarre digital¹¹. Siguiendo la teoría de Pauwels¹² de la “histogénesis causal”, las fibras de colágeno se orientan siempre en la dirección de mayor tensión. De acuerdo con el análisis histológico de la placa plantar, la mayor parte de sus fibras se orientan longitudinalmente en continuidad con las fibras de la fascia, lo que da idea del diseño de esta estructura para resistir primariamente fuerzas tensiles.
- *Prolongación del cartílago de la falange y “amortiguador” de la cabeza metatarsal* (Figura 4): si observamos la relación anatómica del cartílago de la base de la falange proximal y el de la cabeza metatarsal, es fácil discernir la incongruencia de tamaño entre ambos. Para suplir esa carencia, la placa plantar da continuidad al cartílago de la falange de manera que articula con la cabeza metatarsal¹⁰. No obstante, su composición de fibrocartílago, un tejido especializado en el soporte de fuerzas compresivas, también sugiere que la placa plantar no es simplemente una prolongación del cartílago sino más bien un amortiguador de las fuerzas compresivas que genera la cabeza metatarsal en actividades de carga¹³.

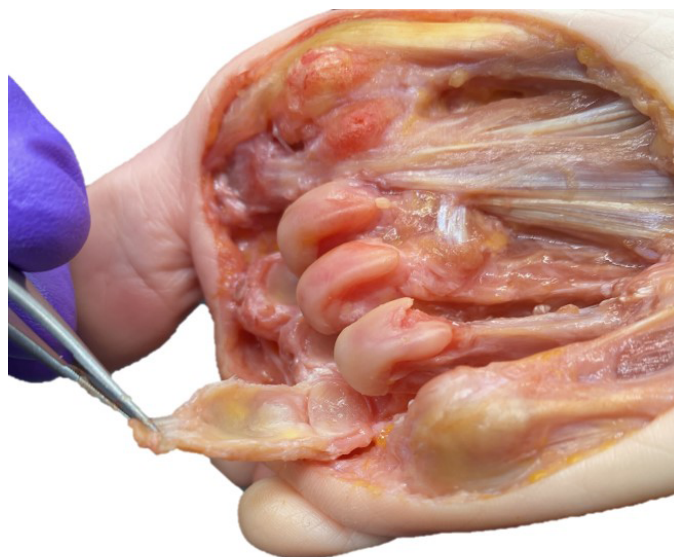


Figura 4. Visión de la placa, de aspecto cóncavo y en continuidad con el pequeño cartílago de la falange proximal para articularse con la cabeza metatarsal y proporcionar un soporte amortiguador a esta durante las actividades de carga.

- *Estabilidad medio-lateral*: los ligamentos colaterales (propios y accesorios) proporcionan estabilidad a la articulación, evitando la desviación del dedo tanto en el plano transversal (clinodactilia) como, conjuntamente con la placa, en el plano sagital (luxación dorsal). Diferentes autores han estudiado la importancia del complejo placa-ligamentos colaterales en la estabilidad articular realizando estudios en cadáver en los que progresivamente seccionan estructuras y miden la fuerza necesaria para producir un desplazamiento o luxación articular. En el estudio de Bhatia y Myerson¹⁴, la sección de la placa plantar redujo en un 30 % la fuerza necesaria para desplazar verticalmente la falange proximal, mientras que la sección de los ligamentos colaterales la redujo en un 46 %. Un estudio similar con una muestra más amplia fue llevado a cabo por Suero y cols.¹⁵, determinando que la sección de la placa reduce la estabilidad en un 19 % mientras que la sección de los ligamentos colaterales lo hace en un 37 %. La sección conjunta de ambas estructuras resultó en un 63 % de reducción de fuerza estabilizadora en el plano sagital. De estos estudios podemos extraer que los ligamentos colaterales son las estructuras más resistentes en la estabilidad articular, si bien el anclaje de los ligamentos colaterales accesorios a la placa implica que ambas estructuras contribuyen al unísono en dicha estabilización. A esta misma conclusión llegaron Barg y cols. en su estudio de 2012¹³. En 2016, Maas y cols. publicaron una revisión sistemática sobre esta cuestión recogiendo la información de los estudios referenciados¹⁶. Entre sus conclusiones hicieron hincapié en el hecho de que al tratarse de estudios sobre piezas anatómicas a las que se les practicaban lesiones agudas el conocimiento extraído de estos experimentos no tiene por qué ser un fiel reflejo

de las situaciones clínicas para lesiones crónicas (la mayoría de los casos que atendemos en consulta) donde los procesos biológicos de curación tienen un papel relevante no tenido en cuenta en las conclusiones de dichos estudios.

Factores etiológicos asociados a la patología de la placa plantar

La placa plantar de la segunda articulación metatarsofalángica es, con diferencia, la que se lesiona con más frecuencia. Entre el 67 y el 90 % de los desgarros de la placa plantar se producen en la segunda articulación metatarsofalángica según algunos estudios^{17,18}. En la mayoría de los casos suelen ser desgarros degenerativos crónicos en mujeres de mediana y avanzada edad. Los desgarros agudos o traumáticos, aunque posibles, son menos habituales y se circunscriben generalmente a pacientes jóvenes con actividad deportiva de moderada a intensa y traumatismo repetitivo o agudo¹⁹.

Diferentes autores han evaluado los factores etiológicos que más se relacionan con la patología de la placa plantar. En 2012, Klein realizó un estudio para correlacionar los hallazgos radiológicos con pacientes sometidos a cirugía por sospecha de rotura del plato flexor. Se obtuvo una muestra de 106 pies en los que en 97 de ellos se constató de forma intraoperatoria la rotura del plato flexor²⁰. De todas las variables estudiadas en las radiografías previas de dichos pacientes, la separación entre segundo y tercer dedo (splaying toe) y la protusión metatarsal superior a 2 mm fueron las variables que más se correlacionaron con los pies con lesión de la placa.

En 2016 Fleischer y cols.²¹ llevaron a cabo un estudio retrospectivo de casos y controles sobre 100 pacientes con patología vs. 200 pacientes sanos, estableciendo que un segundo metatarsiano largo (índice de protusión metatarsal > 4 mm según metodología de Nilssonne) es el principal factor de riesgo para el desarrollo de lesiones en la placa plantar. Otras variables estudiadas, y que no fueron estadísticamente significativas, fueron: índice de masa corporal, tabaquismo, presencia o no de hallux valgus, ángulo intermetatarsal e índice de Seiberg. Sin embargo, variables de interés, como el tipo de calzado habitual o nivel de actividad física, no fueron considerados en este estudio. En general se acepta que los calzados estrechos y de tacón alto son un factor predisponente, ya que provocan fuerzas de hiperextensión crónicas en las articulaciones metatarsofalángicas y con ello predisponen a la elongación y el desgarrar de la placa plantar^{19,21}.

Los resultados del estudio anterior fueron también corroborados por Mann en 2021²². En este caso se analizaron 211 pies de forma retrospectiva, mediante imágenes de resonancia magnética que permitieron establecer el grado de lesión de la placa plantar e imágenes de radiografía convencional para medir el índice de protusión metatarsal siguiendo la metodología de Coughlin. La conclusión de este estudio fue igualmente que existe una correlación entre la protusión del segundo metatarsiano (> 5 mm) y la lesión de la placa plantar.

Las infiltraciones locales de corticosteroides también han sido reportadas como un factor que puede desencadenar la rotura completa de la placa plantar. Si bien no hay estudios que refrenden esta afirmación, sí hay diferentes publicaciones de casos donde el uso de infiltraciones se asoció a una posterior dislocación articular²³.

Exploración y presentación clínica

Durante muchos años, diferentes autores de distintas disciplinas (podiatría, traumatología, fisioterapia...) hicieron referencia a casos frecuentes de procesos inflamatorios e incapacitantes en apariencia no traumáticos y sin implicación sistémica de las articulaciones metatarsofalángicas²⁴. Esto ha dado lugar a una nomenclatura variada hasta que en 2002 Gerard Yu publicó su artículo²⁵, clásico de nuestra disciplina, estableciendo una relación de eventos entre el daño progresivo del plato flexor y estructuras adyacentes y la luxación del segundo dedo (*crossover toe*) aunando esta cronología de eventos en una patología que dio en llamar síndrome de predislocación de las articulaciones metatarsofalángicas, término más aceptado y empleado hoy en día.

El cuadro clínico más habitual en estadios iniciales se produce en mujeres de mediana edad con un dolor focal, agudo o subagudo, en la cara plantar de la articulación afectada. Este dolor tiene características mecánicas, cede con el reposo y los pacientes pueden percibirlo como una masa que van pisando. En ocasiones el edema puede visualizarse a nivel dorsal con una pérdida del contorno de los tendones extensores, si bien el pico de dolor a la palpación es normalmente plantar y antecapital (base de la falange proximal). Es poco habitual que aparezca hiperqueratosis o heloma a nivel de la interfalángica dorsal (aunque puede presentar eritema) o a nivel plantar de la cabeza metatarsal, lo que distingue a esta entidad del dedo en garra clásico. Algunos pacientes pueden relacionar la aparición de los síntomas con un aumento reciente de la actividad o el uso de un calzado concreto durante un tiempo determinado.

La movilidad, tanto pasiva como activa, no suele estar comprometida en fases iniciales y algunos pacientes pueden manifestar cierto alivio al plantarflexionar el dedo. La no instauración de tratamiento en estos estadios iniciales puede conducir de forma inexorable a la subluxación progresiva del dedo en sentido dorsal y esto, a su vez, puede acompañarse de desviación transversal generalmente hacia medial, lo que sugiere un compromiso de los ligamentos colaterales laterales. Como una de las funciones del segundo dedo es la de frenar el desarrollo del HAV, cuando el dedo se vuelve inestable el HAV puede progresar de forma significativa dando como resultado la instauración de una luxación ya irreversible con un *crossover toe* característico²⁶.

Como ya se ha señalado, el binomio de placa plantar y ligamentos colaterales es el principal estabilizador pasivo de la articulación metatarsofalángica. La musculatura intrínseca (lumbricales e interóseos) y la extrínseca (extensores y flexores) actúan como estabilizadores activos mediante un equilibrio de fuerzas que depende en gran medida de la posición de la falange proximal. Cuando la falange proximal adopta progresivamente una posición dorsalflexionada el equilibrio de fuerzas entre la musculatura extrínseca e intrínseca se altera debido a que la inserción de los interóseos y de los lumbricales migra por encima del eje de la articulación perdiendo así su ventaja mecánica plantarflexora²⁷.

La falange proximal puede adoptar una posición dorsalflexionada crónica por diferentes motivos y puede ser consecuencia de lesión de la placa plantar o predisponer a dicha lesión. Todo ello nos deja como conclusión el importante papel que juega la placa plantar como estabilizador principal de la articulación metatarsofalángica menor.

Test clínicos de interés

Dentro de los test clínicos que se han sugerido para valorar la posible lesión de la placa plantar destacan el “Drawer test” (test del cajón) propuesto inicialmente por Thompson y Hamilton y el “Paper pull-out test” (test de presión digital)²⁸. Si bien estos test tienen interés clínico, académico y de demostración para el paciente, en la actualidad, el uso de pruebas de imagen como la ecografía que permiten una visualización directa de las estructuras simplifican mucho el proceso diagnóstico en correlación con los hallazgos clínicos previamente descritos.

En el artículo de Yu y cols.²⁵ también se realizó una propuesta de clasificación del síndrome de predislocación en tres estadios relacionados con los hallazgos clínicos. Estas clasificaciones posteriormente han sido enriquecidas y modificadas en base a hallazgos anatómicos y quirúrgicos, en especial por el equipo de Caio Nery y Michael Couglin y colaboradores en sucesivos estudios^{29,30}.

Si bien estas clasificaciones tienen un interés académico evidente, pueden no siempre ser precisas ni sencillas de establecer sin pruebas de imagen o inspección intraquirúrgica por lo que, para el presente artículo, nos centraremos en los hallazgos ecográficos que comentaremos en el siguiente apartado.

Sonoanatomía y sonopatología de la placa plantar

En la actualidad, siguiendo las recomendaciones de la Sociedad Europea de Radiología Musculoesquelética (ESSR), la resonancia magnética y la ecografía son las dos pruebas de mayor interés para el correcto diagnóstico por imagen de las lesiones de la placa plantar. Ambas tienen un alto grado de sensibilidad y especificidad, lo que lleva al consenso a considerarlas, a día de hoy, equivalentes en el diagnóstico de las lesiones del plato flexor³¹.

Las radiografías convencionales también se emplean de forma rutinaria. Si bien no permiten visualizar la placa, si permiten observar los efectos de la lesión de esta y los ligamentos colaterales en la alineación ósea y son imprescindibles en la planificación quirúrgica cuando van a acometerse actuaciones, como por ejemplo osteotomías acortadoras y/o elevadoras.

La principal ventaja de la ecografía estriba por un lado en su inmediatez y bajo coste y por otro en la posibilidad de visualizar la estructura en tiempo real y con maniobras dinámicas de estrés que permiten una mejor comprensión del mecanismo lesional. Sin embargo, la resonancia permite una mayor precisión para establecer el grado de lesión, así como la visualización adicional de otras estructuras de interés como los ligamentos colaterales que mediante ecografía no pueden valorarse³².

En la última década hemos asistido a un aumento muy significativo de publicaciones en este sentido^{7,33-36}. En 2021, Catherine McCarthy publicó un artículo de revisión sobre ecografía de la placa plantar que emplearemos para la presente revisión como artículo de referencia³⁷. Así, en cuanto a hallazgos ecográficos relacionados con la patología de la placa plantar, vamos a diferenciar entre hallazgos directos e indirectos.

Técnica de exploración

Como en cualquier exploración ecográfica, realizamos cortes tanto longitudinales como transversales (ejes largo y corto). En ge-

neral, las imágenes longitudinales dinámicas son las que aportan mayor información sobre la integridad de la placa. Para ello, es de interés dorsiflexionar el dedo con la mano pasiva tensando la placa, que pasa de tener un aspecto curvado a un aspecto más lineal y mejor definido.

Por otra parte, es importante realizar barridos en sentido latero-medial. Los desgarros se describen en origen con mayor frecuencia a lo largo de la bandeleta lateral insercional de la placa plantar, siendo menos frecuente encontrar desgarros puramente centrales o mediales que suelen aparecer cuando progresa la lesión desde la banda lateral. Esto se explica porque los metatarsianos menores están relativamente supinados y el cóndilo lateral se posiciona más plantarmente que el cóndilo medial, concentrando así las fuerzas compresivas en la bandeleta lateral de la placa⁷ (Figura 5). Igualmente, este hallazgo se corresponde con la tendencia del 2.º dedo a desviarse medialmente, ya que el fallo progresivo en la placa, ligamento colateral y cápsula lateral favorece la contractura del lado medial predisponiendo a la formación del *crossover toe*³⁸.

Finalmente, siempre es de interés realizar ecografías comparativas con la placa plantar del pie contralateral cuando esta es asintomática, y en especial si tenemos dudas sobre una lesión no tan concluyente en la exploración.

Criterios de normalidad de la imagen ecográfica

- *Corte longitudinal (eje largo)*: la placa plantar normal se muestra ecográficamente como una estructura curvilínea ligeramente ecogénica con ecotextura granulada homogénea. Esta textura permite la diferenciación, no siempre definida, con los tendones flexores subyacentes de textura fibrilar. La superficie articular de la placa se define con precisión limitando con el cartilago hialino de la cabeza metatarsal, hipoecoico (Figura 6). En la unión con la falange proximal, bien definida, el contorno óseo es normalmente liso y en la placa puede aparecer una zona triangular más ecogénica que se ha descrito como un hallazgo ecográfico normal y podría representar una mayor proporción de fibras de colágeno. La unión proximal al cuello metatarsal, en cambio, tiene una definición pobre en imagen ecográfica (Figura 6).
- *Corte transverso (eje corto)*: la placa plantar tendrá una forma curvada que acuna a la cabeza metatarsal. La ecotrama es igualmente granulada, si bien en este corte el aspecto del moteado puede ser más heterogéneo al reflejar la disposición longitudinal de los haces de colágeno. Sobre la placa se revelan los tendones flexores que pueden identificarse fácilmente mediante maniobras de anisotropía (Figura 7).

Hallazgos ecográficos directos

Los desgarros de la placa plantar pueden manifestarse a nivel ecográfico de diferentes maneras, afectando a la estructura parcial o totalmente.

1. *Defecto focal anecoico o hipoecoico*. Se aprecian como una hendidura discreta en la zona profunda del tejido (zona que articula con la cabeza metatarsal) en su margen lateral. Cuando las fibras superficiales están intactas hablamos de

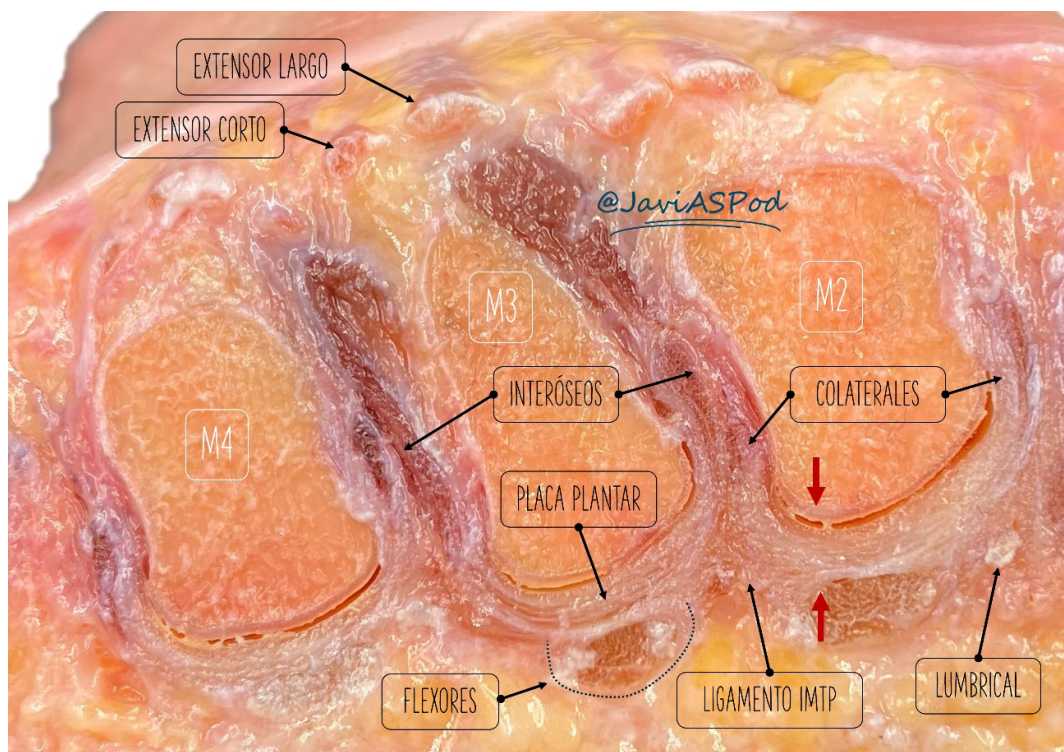


Figura 5. Corte transverso de las articulaciones metatarsofalángicas con las principales estructuras. Se aprecia la supinación metatarsal que explica el aumento de compresión en la banda lateral de la placa plantar (las flechas rojas en el segundo metatarsiano indican la zona donde se lesiona con mayor frecuencia).

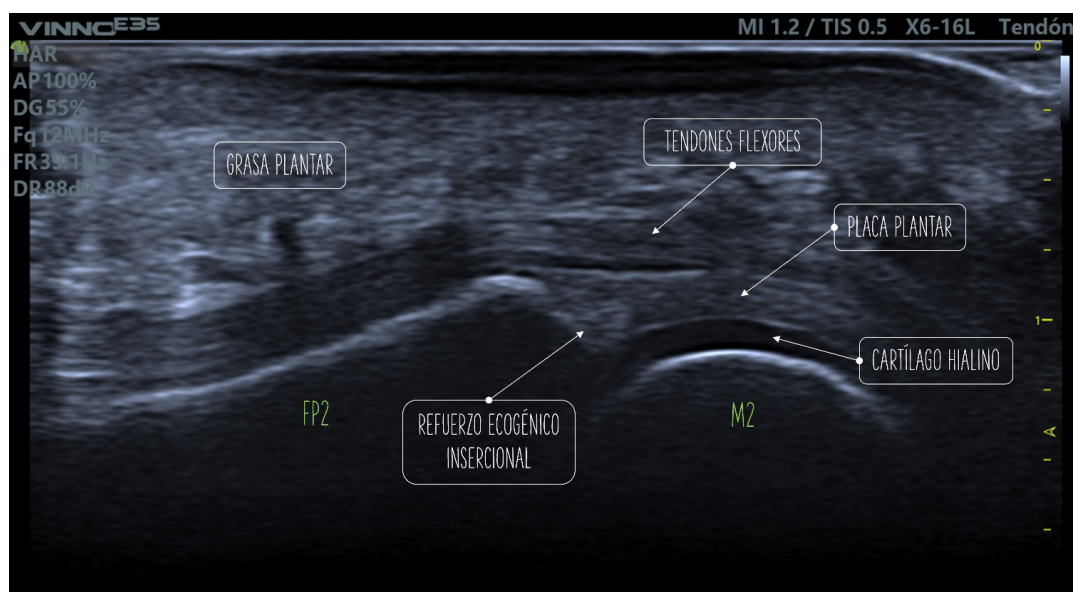


Figura 6. Imagen ecográfica normal de una placa plantar y resto de estructuras adyacentes. Corte longitudinal (eje largo).

un desgarro de espesor parcial, mientras que cuando dicho desgarro atraviesa todo el tejido hasta su región superficial hablamos de un desgarro de espesor total³⁹ (Figura 8).

2. *Aplanamiento y atenuación de la placa plantar.* En estos casos no se observa un defecto de forma tan clara, pero debe llamarnos la atención cuando la zona de inserción, generalmen-

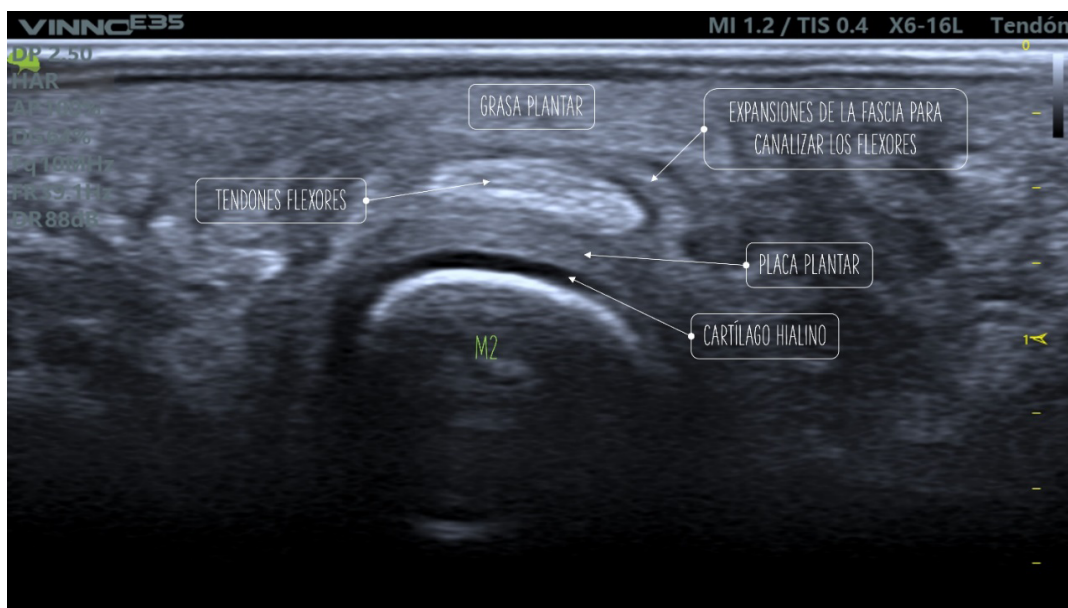


Figura 7. Imagen ecográfica normal de una placa plantar y resto de estructuras adyacentes. Corte transversal (eje corto).

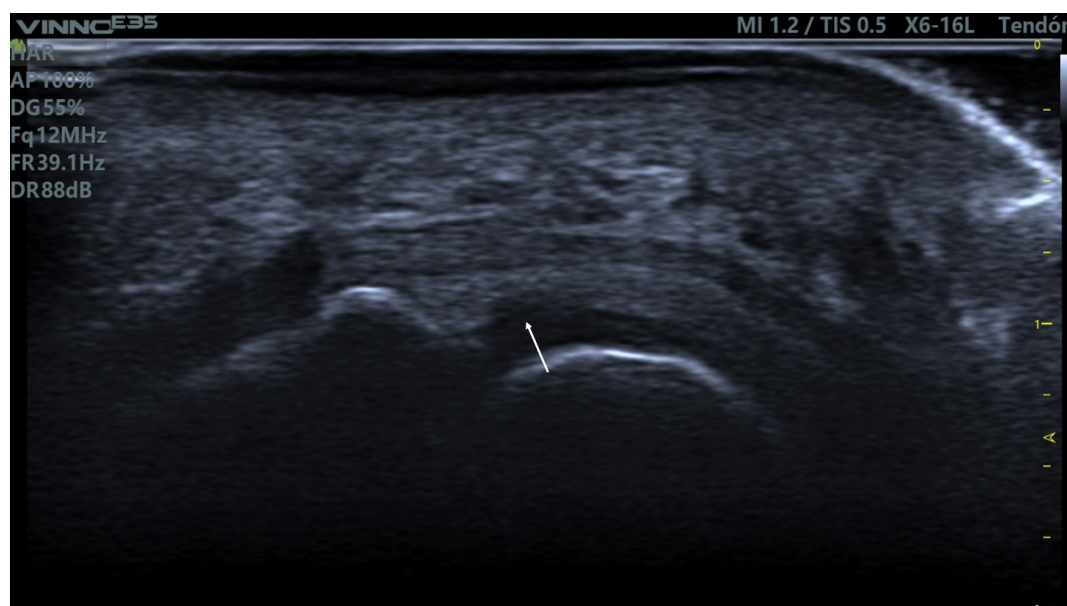


Figura 8. Corte longitudinal con defecto focal anecoico en la banda lateral que sugiere un desgarro de espesor parcial en la placa plantar. Localización profunda en relación con la cabeza metatarsal. Las fibras superficiales permanecen intactas.

te más gruesa, se aprecia más adelgazada que la zona media o proximal de la placa. Esto sugiere generalmente la presencia de un desgarro transversal que abarca desde la porción lateral hasta la porción central de la placa⁴⁰ (Figura 9).

3. *No visualización de placa plantar.* La no visualización de la placa plantar puede indicar un desgarro transversal completo con retracción del tejido, lo que a menudo está asociado a una luxación dorsal de la falange proximal.

Como se ha señalado, en todos los casos las maniobras dinámicas de tensión del dedo (y la placa) son esenciales para establecer la presencia o no de un desgarro y su magnitud^{41,42}. La incapacidad de tensar la placa (pasar de su estado curvado a un estado lineal) así como la pérdida de movimiento congruente entre la falange proximal y la placa son signos muy sugerentes de desgarro que solo pueden apreciarse mediante dichas maniobras.

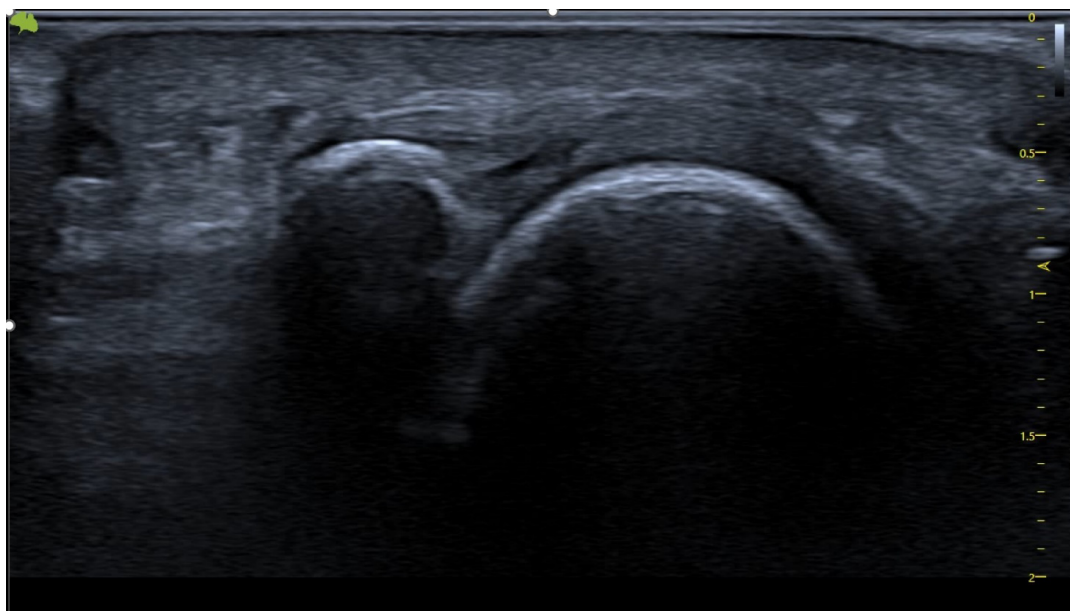


Figura 9. Corte longitudinal con desgarro longitudinal extenso solo visible mediante maniobras dinámicas de flexión dorsal del dedo.

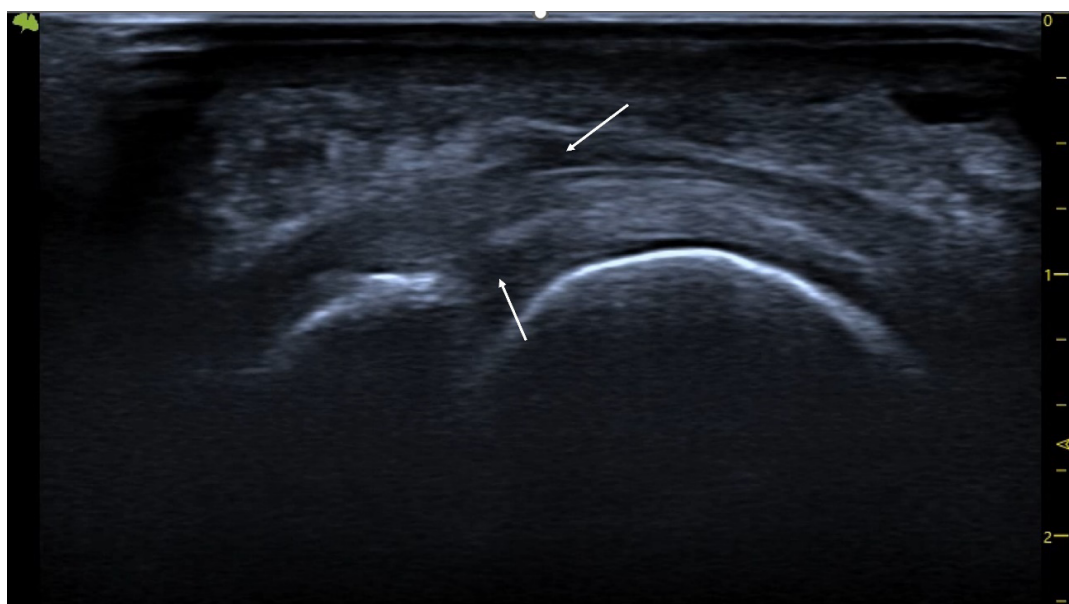


Figura 10. Corte longitudinal con defecto focal de espesor total en la placa plantar con distensión de la vaina de los flexores por extravasación de líquido sinovial hacia las mismas.

Hallazgos ecográficos indirectos

1. *Líquido articular (sinovitis) plantar o dorsal. Derrame sinovial.* Como la placa plantar constituye el cierre plantar de la cápsula articular, los desgarros de la placa pueden dar lugar a un aumento significativo del líquido sinovial que se manifiesta como un derrame sinovial apreciable a nivel dorsal y a nivel plantar. En algunos casos este líquido puede filtrarse

hacia los tendones flexores manifestando un halo hipoeico en los mismos que se asemeja a la imagen característica de una tenosinovitis con distensión de la vaina tendinosa (Figura 10).

2. *Bursitis de la grasa plantar.* En relación con el hallazgo anterior, algunos casos de desgarros de la placa plantar pueden acompañarse también de un infiltrado hipoeico en la grasa plantar adyacente. Esto puede ser un defecto primario del

exceso de compresión sobre dicha grasa (compresión que también forma parte de la etiología de lesión compresiva de la placa) o bien el resultado de un infiltrado de líquido sinovial por extravasación de la rotura capsular como se ha comentado anteriormente. Es frecuente en estos casos advertir la presencia de un doppler positivo (Figura 11).

3. *Entesofitos ecogénicos en la falange proximal.* En estadios avanzados es común la presencia de una marcada irregularidad de la cortical plantar de la base de la falange proximal, así como la presencia de entesofitos asociados a desgarros de la placa, como sucede en el caso de otros ligamentos donde la tracción puede provocar avulsiones del tejido óseo⁴³ (Figura 12).

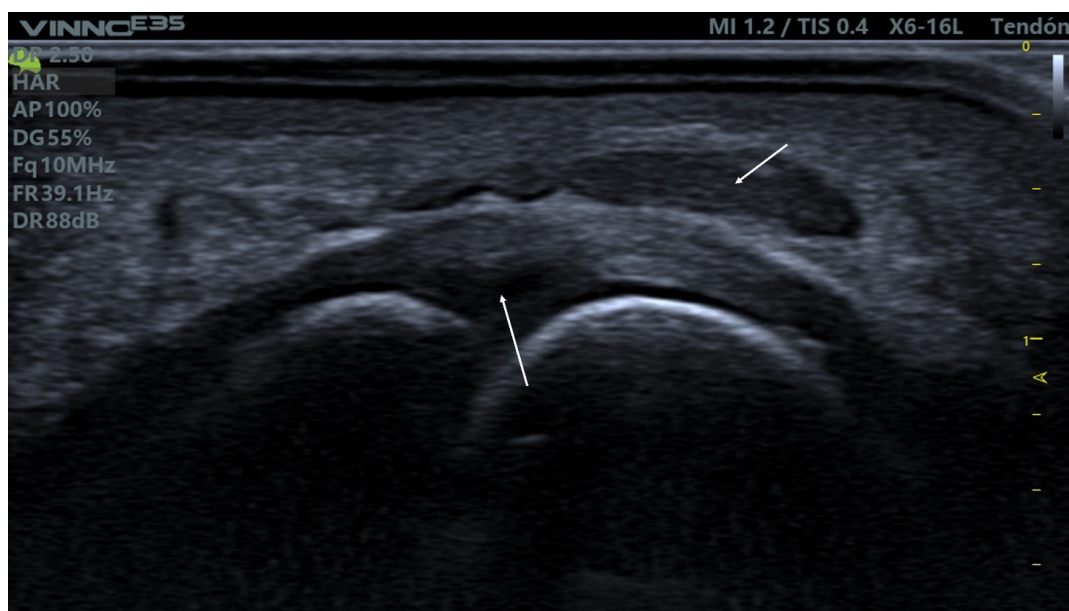


Figura 11. Corte longitudinal con bursitis o edema en la grasa plantar subcapital presente como una masa hipoeoica superficial a los tendones flexores como causa primaria o extravasación de líquido sinovial por desgarro de la placa plantar.

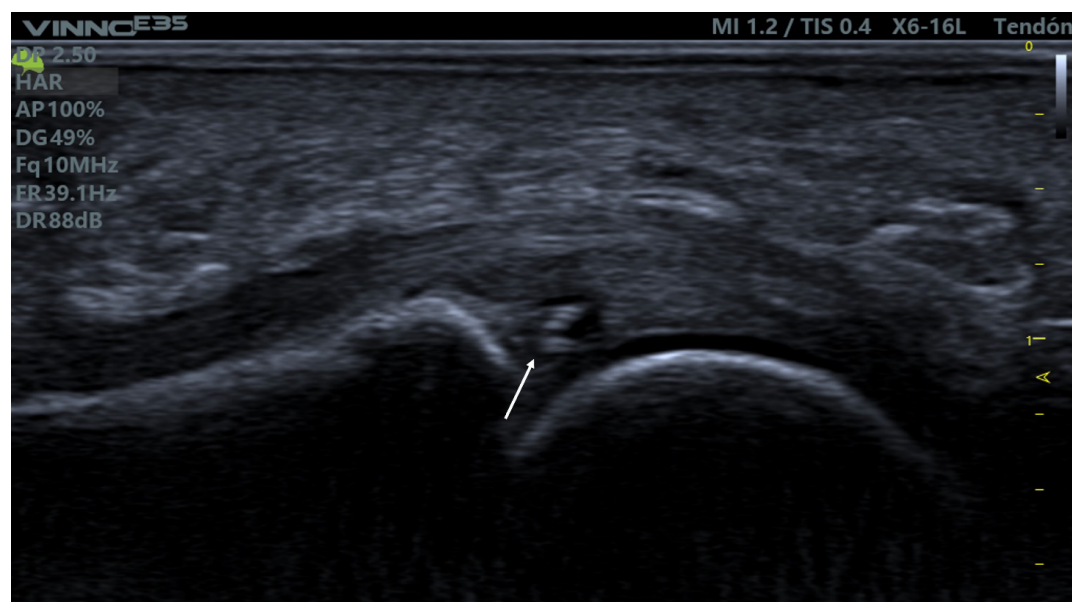


Figura 12. Corte longitudinal con irregularidad cortical y presencia de entesofitos en el espesor insercional de la placa asociados a una rotura de espesor prácticamente total de la misma.

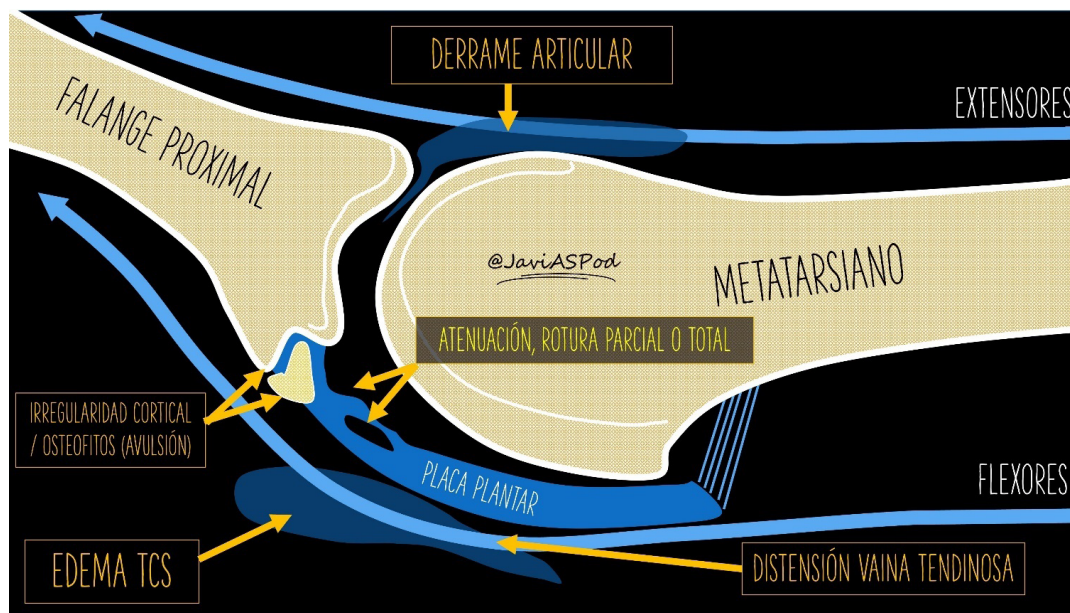


Figura 12. Síntesis esquemática de lesiones visibles mediante ecografía en la placa plantar y tejidos adyacentes en un corte longitudinal (eje largo).

Conclusiones

A modo de conclusión de la presente revisión, vamos a abordar un debate clásico en nuestra disciplina sobre qué fuerzas predominan en las lesiones de la placa plantar. Como hemos visto, la placa es un tejido ultraespecializado y de su disposición anatómica y su composición histológica podemos deducir que está preparada para soportar tanto fuerzas compresivas como tensiles. El cómo o cuánto predominan unas u otras dependerá probablemente de las características de cada paciente.

Los argumentos a favor del predominio de fuerzas compresivas se basan en que el factor etiológico más claramente establecido en la literatura científica es la presencia de un segundo metatarsiano largo o un primer metatarsiano corto. En ambos supuestos, el exceso de protusión metatarsal o la insuficiencia del primer radio aumentan las fuerzas compresivas sobre la cabeza del segundo metatarsiano. Esto a su vez se corresponde con un patrón habitual de lesión que observamos en ecografía: lesiones focales en la porción central profunda (*midsubstance*) de la placa en su margen lateral, donde el cóndilo metatarsal comprime con mayor fuerza.

Sin embargo, en otro grupo diferenciado de pacientes observamos cómo las lesiones tienden a ser más distales, en la zona puramente ligamentosa de la placa y asociadas a irregularidades de la cortical de la falange e incluso lesiones por avulsión ósea y entesofitos, lo que sugiere un mecanismo de lesión por tracción y, por lo tanto, de predominio tensil. Además, en muchos pacientes la instauración de una ferulización con flexión plantar del dedo mediante vendajes de corbatín o dispositivos diseñados para tal fin, neutralizando las fuerzas dorsiflexoras, se traduce en un alivio sintomático muy significativo.

Por otra parte, un factor poco estudiado en esta y otras patologías es la pérdida de competencia de la grasa plantar para absorber y disipar las fuerzas compresivas en actividades de carga. Esto podría

explicar por qué determinadas lesiones en la planta del pie tienen características demográficas similares en su edad de aparición que coincide con el momento en que la grasa plantar va sufriendo un deterioro significativo tanto a nivel cuantitativo como a nivel cualitativo, aumentando así las fuerzas compresivas sobre tejidos internos y predisponiendo a la lesión de estos.

Con toda seguridad, tanto las fuerzas tensiles como las fuerzas compresivas contribuyen en diferente proporción según cada paciente en base a sus características anatómicas y su actividad de la que podemos deducir si el mecanismo lesional es más acusado en 2.º o en 3.º *rocker*. Es deber del clínico establecer el predominio de unas u otras para determinar el diagnóstico en base a la exploración clínica y la anamnesis si bien, en el momento actual, con la accesibilidad de pruebas de imagen como la ecografía, es altamente recomendable establecer el grado de lesión y su pronóstico para decidir cuál es el tratamiento más adecuado en cada caso.

Bibliografía

1. Deland JT, Lee KT, Sobel M, Dicarlo EF. Anatomy of the Plantar Plate and Its Attachments in the Lesser Metatarsal Phalangeal Joint. *Foot Ankle Int.* 1995;16(8):480-6. DOI: 10.1177/107110079501600804.
2. Johnston RB, Daniels T, Smith J. The Plantar Plate of the Lesser Toes: An Anatomical Study in Human Cadavers. *Foot Ankle Int.* 1994;15(5):276-82. DOI: 10.1177/107110079401500508.
3. Hatch DJ. Anatomy: Plantar Plate. *Clin Podiatr Med Surg.* 2022;39(3):411-9. DOI: 10.1016/j.cpm.2022.02.004.
4. Gregg J, Marks P, Silberstein M, Schneider T, Kerr J. Histologic anatomy of the lesser metatarsophalangeal joint plantar plate. *Surg Radiol Anat.* 2007;29(2):141-7. DOI: 10.1007/s00276-007-0188-2.
5. Mohana-Borges AVR, Theumann NH, Pfirrmann CWA, Chung CB, Resnick DL, Trudell DJ. Lesser Metatarsophalangeal Joints: Standard MR Imaging, MR Arthrography, and MR Bursography—Initial Results in 48 Cadaveric Joints. *Radiology.* 2003;227(1):175-82. DOI: 10.1148/radiol.2271020283.

6. Kelikian AS, Sarrafian SK. Sarrafian's anatomy of the foot and ankle : descriptive, topographical, functional. 3^a ed. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins (ed); 2011. p. 759.
7. Nery C, Baumfeld D, Umans H, Yamada AF. MR Imaging of the Plantar Plate. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2017;25(1):127-44. DOI: 10.1016/j.mric.2016.08.007.
8. Finney FT, McPheters A, Singer NV, Scott JC, Jepsen KJ, Holmes JR, et al. Microvasculature of the Plantar Plate Using Nano-Computed Tomography. *Foot Ankle Int*. 2019;40(4):457-64. DOI: 10.1177/1071100718816292.
9. Park JV, Finney FT, Singer NV, Saunders NE, Walley KC, Holmes JR, et al. Proximal Plantar Plate of Lesser Toe Metatarsophalangeal Joint Vascular Supply. *Foot Ankle Int*. 2023;44(1):75-80. DOI: 10.1177/10711007221140043.
10. Viladot Voegeli A, Gasch Blasí J. La placa plantar. *Rev Pie Tobillo*. 2015;29(1):2-10. DOI: 10.1016/S1697-2198(16)30002-7.
11. Kirby KA. Biomecánica del pie y la extremidad inferior V: Artículos de Precisión Intracast. 2014-2018. Smith JJ (ed.). Payson (Arizona): Precision Intracast Inc; 2019. p. 1-157.
12. Pauwels F. Biomechanics of the Locomotor Apparatus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1980.
13. Barg A, Courville XF, Nickisch F, Bachus KN, Saltzman CL. Role of collateral ligaments in metatarsophalangeal stability: A cadaver study. *Foot Ankle Int*. 2012;33(10):877-82. DOI: 10.3113/FAI.2012.0877.
14. Bhatia D, Myerson MS, Curtis MJ, Cunningham BW, Jinnah RH. Anatomical restraints to dislocation of the second metatarsophalangeal joint and assessment of a repair technique. *J Bone Joint Surg*. 1994;76(9):1371-5. DOI: 10.2106/00004623-199409000-00012.
15. Suero EM, Meyers KN, Bohne WHO. Stability of the metatarsophalangeal joint of the lesser toes: A cadaveric study. *J Orthop Res*. 2012;30(12):1995-8. DOI: 10.1002/jor.22173.
16. Maas NMG, van der Grinten M, Bramer WM, Kleinrensink GJ. Metatarsophalangeal joint stability: A systematic review on the plantar plate of the lesser toes. *J Foot Ankle Res*. 2016;9:32. DOI: 10.1186/s13047-016-0165-2.
17. Umans H, Srinivasan R, Elsinger E, Wilde GE. MRI of lesser metatarsophalangeal joint plantar plate tears and associated adjacent interspace lesions. *Skeletal Radiol*. 2014;43(10):1361-8. DOI: 10.1007/s00256-014-1920-8.
18. Nery C, Coughlin MJ, Baumfeld D, Mann TS. Lesser metatarsophalangeal joint instability: Prospective evaluation and repair of plantar plate and capsular insufficiency. *Foot Ankle Int*. 2012;33(4):301-11. DOI: 10.3113/FAI.2012.0301.
19. Linklater JM, Bird SJ. Imaging of Lesser Metatarsophalangeal Joint Plantar Plate Degeneration, Tear, and Repair. *Semin Musculoskelet Radiol*. 2016;20(2):192-204. DOI: 10.1055/s-0036-1581115.
20. Klein EE, Weil L, Knight J. The Underlying Osseous Deformity in Plantar Plate Tears: A Radiographic Analysis. *Foot Ankle Spec*. 2013;6(2):108-18. DOI: 10.1177/1938640012463060.
21. Weil L, Fleischer AE, Klein EE, Ahmad M, Shah S, Catena F, et al. Association of Abnormal Metatarsal Parabola with Second Metatarsophalangeal Joint Plantar Plate Pathology. *Foot Ankle Int*. 2017;38(3):289-97. DOI: 10.1177/1071100716674671.
22. Mann TS, Nery C, Baumfeld D, Fernandes EA. Is second metatarsal protrusion related to metatarsophalangeal plantar plate rupture? *Am J Roentg*. 2021;216(1):132-40. DOI: 10.2214/AJR.19.22563.
23. Ito E, Shima H, Toge K, Hirai Y, Tsujinaka S, Yasuda T, et al. Dislocations of the second and third metatarsophalangeal joints after local steroid injection in patients with refractory metatarsalgia: A case report. *SAGE Open Med Case Rep*. 2021;9:2050313X211046744. DOI: 10.1177/2050313X211046744.
24. Mann RA, Mizel MS. Monarticular Nontraumatic Synovitis of the Metatarsophalangeal Joint: A New Diagnosis? *Foot Ankle*. 1985;6(1):18-21. DOI: 10.1177/107110078500600104.
25. Yu GV, Judge MS, Hudson JR, Seidelmann FE. Predislocation Syndrome Progressive Subluxation/Dislocation of the Lesser Metatarsophalangeal Joint. *JAPMA*. 2002;92(4):182-99.
26. Butterworth ML, Block AJ. Update on Fibrocartilaginous Disease Clinical Examination. *Clin Podiatr Med Surg*. 2022;39(3):371-92. DOI: 10.1016/j.cpm.2022.03.002.
27. Dalmau-Pastor M, Fargues B, Alcolea E, Martínez-Franco N, Ruiz-Escobar P, Vega J, et al. Extensor apparatus of the lesser toes: Anatomy with clinical implications - Topical review. *Foot Ankle Int*. 2014;35(10):957-69. DOI: 10.1177/1071100714546189.
28. Doty JF, Coughlin MJ, Weil L, Nery C. Etiology and management of lesser toe metatarsophalangeal joint instability. *Foot Ankle Clin*. 2014;19(3):385-405. DOI: 10.1016/j.fcl.2014.06.013.
29. Nery C, Coughlin M, Baumfeld D, Raduan F, Mann TS, Catena F. How to classify plantar plate injuries: parameters from history and physical examination. *Rev Bras Ortop (English Edition)*. 2015;50(6):720-8. DOI: 10.1016/j.rboe.2015.10.009.
30. Nery C, Umans H, Baumfeld D. Etiology, Clinical Assessment, and Surgical Repair of Plantar Plate Tears. *Semin Musculoskelet Radiol*. 2016;20(2):205-13. DOI: 10.1055/s-0036-1581114.
31. Sconfienza LM, Albano D, Allen G, Bazzocchi A, Bignotti B, Chianca V, et al. Clinical indications for musculoskeletal ultrasound updated in 2017 by European Society of Musculoskeletal Radiology (ESSR) consensus. *Eur Radiol*. 2018;28(12):5338-51. DOI: 10.1007/s00330-018-5474-3.
32. Albright RH, Brooks BM, Chingre M, Klein EE, Weil LS, Fleischer AE. Diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging (MRI) versus dynamic ultrasound for plantar plate injuries: A systematic review and meta-analysis. *Eur J Radiol*. 2022;152:110315. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110315.
33. Dina V, von Ranke F, Costa F, Marchiori E. Evaluation of lesser metatarsophalangeal joint plantar plate tears with contrast-enhanced and fat-suppressed MRI. *Skeletal Radiol*. 2016;45(5):635-44. DOI: 10.1007/s00256-016-2349-z.
34. Hulstaert T, Shahabpour M, Provyn S, Lenchik L, Simons P, Vanheste R, et al. Forefoot Pain in the Lesser Toes: Anatomical Considerations and Magnetic Resonance Imaging Findings. *Can Assoc Radiol J*. 2019;70(4):408-15. DOI: 10.1016/j.carj.2019.06.010.
35. Mann TS, Nery CA de S, Baumfeld D, Fernandes E de A. Degenerative injuries of the metatarsophalangeal plantar plate on magnetic resonance imaging: a new perspective. *Einstein (Sao Paulo)*. 2022;20:eAO6543. DOI: 10.31744/einstein_journal/2022AO6543.
36. Reijnierse M, Griffith JF. High-resolution ultrasound and MRI in the evaluation of the forefoot and midfoot. *J Ultrason*. 2023;23(95):249-69. DOI: 10.15557/JoU.2023.0033.
37. McCarthy CL, Thompson G V. Ultrasound findings of plantar plate tears of the lesser metatarsophalangeal joints. *Skelet Radiol*. 2021;50(8):1513-25. DOI: 10.1007/s00256-020-03708-1.
38. Carlson RM, Dux K, Stuck RM. Ultrasound Imaging for Diagnosis of Plantar Plate Ruptures of the Lesser Metatarsophalangeal Joints: A Retrospective Case Series. *J Foot Ankle Surg*. 2013;52(6):786-8. DOI: 10.1053/j.jfas.2013.05.009.
39. Stone M, Eyler W, Rhodenizer J, Van Holsbeeck M. Accuracy of sonography in plantar plate tears in cadavers. *J Ultrasound Med*. 2017;36(7):1355-61. DOI: 10.7863/ultra.16.06067.
40. Yamada AF, Crema MD, Nery C, Baumfeld D, Mann TS, Skaf AY, et al. Second and third metatarsophalangeal plantar plate tears: Diagnostic performance of direct and indirect MRI features using surgical findings as the reference standard. *Am J Roentgen*. 2017;209(2):W100-8. DOI: 10.2214/AJR.16.17276.
41. Feuerstein CA, Weil L, Weil LS, Klein EE, Fleischer A, Argerakis NG. Static Versus Dynamic Musculoskeletal Ultrasound for Detection of Plantar Plate Pathology. *Foot Ankle Spec*. 2014;7(4):259-65. DOI: 10.1177/1938640014537300.
42. Donegan RJ, Stauffer A, Heaslet M, Poliskie M. Comparing Magnetic Resonance Imaging and High-Resolution Dynamic Ultrasonography for Diagnosis of Plantar Plate Pathology: A Case Series. *J Foot Ankle Surg*. 2017;56(2):371-4. DOI: 10.1053/j.jfas.2016.11.009.
43. Hodes A, Umans H. Metatarsalgia. *Radiol Clinics*. 2018;56(6):877-92. DOI: 10.1016/j.rcl.2018.06.004.



REVIEW

Bilingual article English/Spanish

Rev Esp Podol. 2024;xx(x):xx-xx

DOI: <http://dx.doi.org/10.20986/revespod.2024.1693/2024>

Anatomy and sonopathology of the metatarsophalangeal plantar plate

Anatomía y sonopatología de la placa plantar metatarsofalángica

Javier Alcalá Sanz¹, Ana Isabel Marcos Casado¹, Jordi Sánchez Mercè², Bernat Cabestany Perich³ y Pedro Nogales Gómez⁴

¹Clínica del Pie Alcalá. Bormujos, Sevilla, España. ²Clínica del Peu Maresme. Mataró, Barcelona, España. ³Clínica Novamedicum. Sabadell, Barcelona, España. ⁴Clínica Podoactiva Málaga, España

Keywords:

Plantar plate, flexor plate, forefoot anatomy, forefoot pain, metatarsophalangeal predislocation syndrome, claw toe, forefoot sonography.

Abstract

The plantar plate of the lesser metatarsophalangeal joints plays a fundamental role in digital stability, maintaining the correct alignment of the finger with its metatarsal and also acting as an anchor point of the rest of the articular stabilizing structures. Injury to this specialized ligament precipitates deformity of the lesser toes, especially the second, and is a common reason for consultation in the podiatry clinic. In this article we carry out a detailed review of its anatomical and histological characteristics, its mechanical functions and injury mechanisms as well as its clinical examination and through imaging tests, dedicating a special section to ultrasound, which has emerged in the last decade as an accessible resource and increasingly common in podiatry consultations. Thanks to the use of this technique we can make an economical, real-time, dynamic and more precise diagnosis of the type of injury that occurs in the plantar plate or in the adjacent tissues, from small strains to partial or complete tears accompanied by a greater or less bone damage and inflammation in peripheral soft tissues such as plantar fat pad or flexor tendons. The characterization of the lesions allows us to correlate the etiology with the lesion much better, as well as establish the greater or lesser need for treatment and a more accurate prognosis for each patient.

Palabras clave:

Placa plantar, plato flexor, anatomía del antepié, metatarsalgia, síndrome de predislocación metatarsofalángica, dedo en garra, ecografía del antepié.

Resumen

La placa plantar de las articulaciones metatarsofalángicas menores juega un papel fundamental en la estabilidad digital, manteniendo la correcta alineación del dedo con su metatarsiano y actuando asimismo de punto de anclaje para el resto de estructuras estabilizadoras de dicha articulación. La lesión de este ligamento especializado precipita la deformidad de los dedos menores, en especial el segundo, y es un motivo de consulta habitual en la clínica podológica. En el presente artículo realizamos una revisión pormenorizada de sus características anatómicas e histológicas, sus funciones mecánicas y mecanismos lesionales, así como su exploración clínica y mediante pruebas de imagen, dedicando un apartado especial a la ecografía que se ha erigido en la última década como un recurso accesible y cada vez más habitual en las consultas de podología. Gracias al uso de esta técnica podemos realizar un diagnóstico económico, en tiempo real, dinámico y más preciso del tipo de lesión que se presenta en la placa plantar o en los tejidos adyacentes, desde pequeñas distensiones hasta roturas parciales o completas acompañadas de un mayor o menor daño óseo e inflamación en los tejidos blandos periféricos, como la grasa plantar o los tendones flexores. La caracterización de las lesiones permite correlacionar mucho mejor la etiología con la lesión, así como establecer la mayor o menor necesidad de tratamiento y un pronóstico más certero para cada paciente.

Received: 06-04-2024

Accepted: 14-05-2024



0210-1238 © The Authors. 2024.
Editorial: INSPIRA NETWORK GROUP S.L.
This is an Open Access paper under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(www.creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Correspondence:

Javier Alcalá Sanz
javialcalasanz@gmail.com

Anatomy and histology of the plantar plate

The plantar plate (i.e. flexor plate, glenoid plate) of the lesser metatarsophalangeal joints plays a crucial role in toe stability, being the main anatomical structure, in synergy with the collateral ligaments, that counteracts the dorsiflexion forces of these joints.

It is a small, highly specialized structure, mainly fibrocartilaginous, that continues the deep terminal zone of the plantar fascia and is firmly anchored to the base of the proximal phalanx of the toes (Figure 1), also providing an anchorage surface for other ligamentous and tendinous structures and, on its plantar side, serving as a passage area for the flexor tendons. Due to its location, characteristics, and function, it is compared to the sesamoids of the first metatarsophalangeal joint^{1,2}.

Despite its small size, it is a complex structure, firm yet flexible, serving as an anchorage point for the anatomical structures in its region, highlighting its importance in joint stability^{3,4}. To better understand its anatomy and mechanical function, it is useful to study its different regions in detail, as well as their histological variability¹⁻⁴:

- *General characteristics*: for the most part, the plantar plate is a fibrocartilaginous tissue mainly composed of type 1 collagen (similar to knee cartilage) and to a lesser extent type 2 (75 vs. 21 %) without elastin fibers². Its thickness ranges from 2 to 5 mm (greater in its central area), with an average width of 10 mm and an average length of 17-19 mm. In the dorsal 2/3, the fibers are oriented longitudinally, while in its plantar 1/3, they are oriented transversely in continuity with the deep transverse intermetatarsal ligament and collateral ligaments.
- *Proximal attachment to the metatarsal*: in its proximal area, the plantar plate attaches to the metatarsal neck and head (just proximal to the articular cartilage) through a thin (0.4 mm), fibrous tissue with synovial characteristics.
- *Distal anchorage to the base of the proximal phalanx*: its insertion at the plantar area of the base of the proximal phalanx is strong and composed of a higher proportion of fibroblasts,

forming a tissue with ligamentous characteristics⁴. The entire thickness of the structure inserts into the bone through two reinforced bands, medial and lateral, and in continuity with the cartilage, forming a concave cavity for the metatarsal head. In its central area, there may be a small central synovial recess that is sometimes confused with pathology in MRI images (pseudo-rupture of the plantar plate)⁵ (Figure 2).

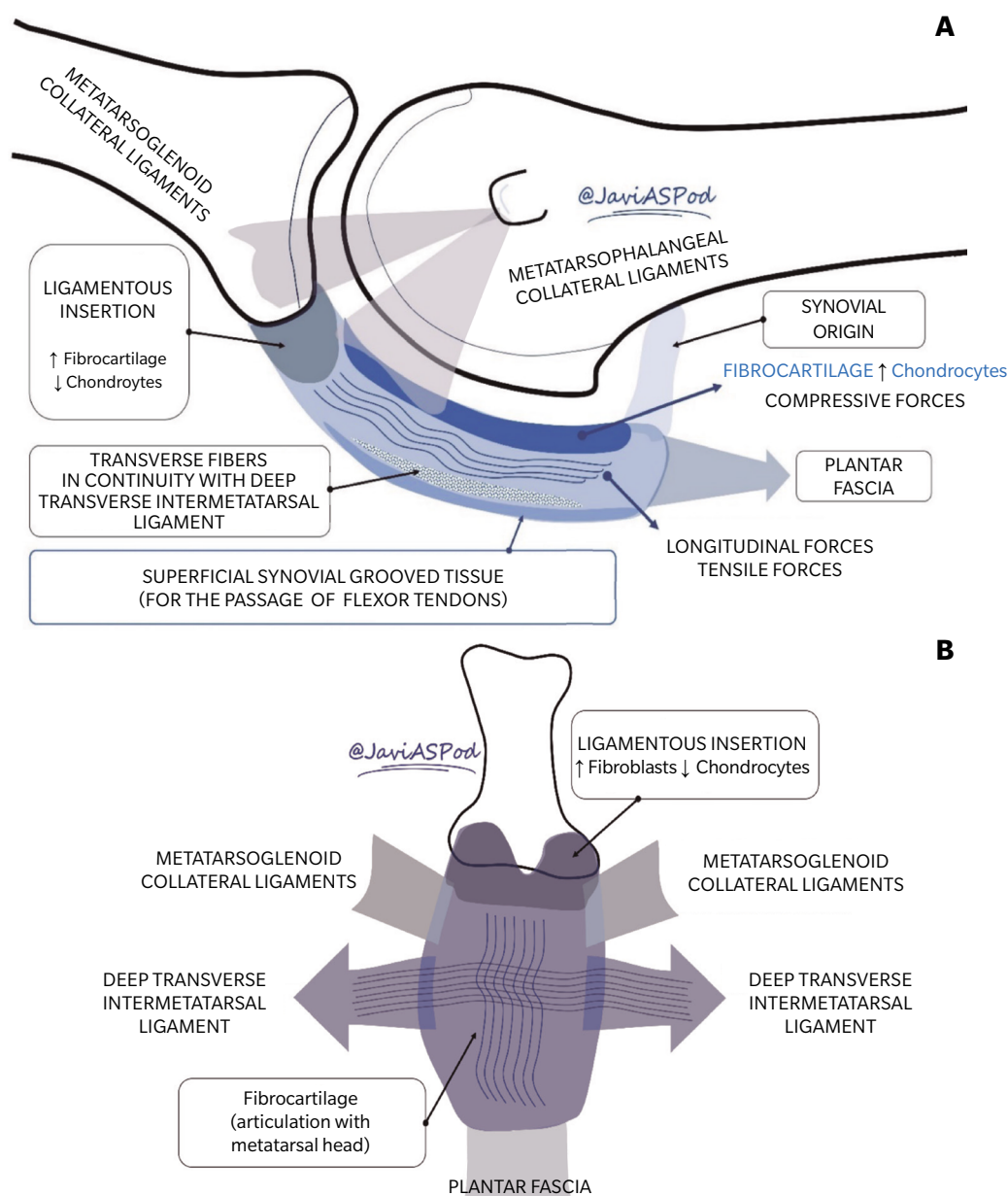
- *Central portion (midsubstance)*: in its central portion, it is useful to distinguish between its dorsal 2/3, which are composed of fibrocartilaginous tissue with a higher proportion of chondrocytes, forming an articular surface for the metatarsal head with characteristics similar to the knee meniscus^{4,5}. On its plantar side, it forms a channeled structure of fibrous and synovial tissue that serves as a link between the plate and the flexor tendon sheath, allowing their sliding.
- *Muscle-ligamentous relationships*: the plantar plate serves as a base for the anchorage of different ligamentous structures. In the original description by Kelikian and Sarrafian⁶, two collateral ligamentous pathways (medial and lateral) are described, differentiated into metatarsophalangeal fibers (connecting the metatarsal epicondyle with the base of the phalanx) and metatarsoglenoid fibers that connect the epicondyle of the metatarsal head directly with the plate. Both groups of ligaments are intracapsular (Figure 3A). Recently, a different nomenclature for these ligaments has been proposed, distinguishing between proper and accessory collateral ligaments⁷. On the other hand, the plantar plates also act as a union nexus



Figure 1. Overview of the plantar plate covering the head of the fourth metatarsal (plantar view). By retracting the plate, we can observe its anchorage to the base of the phalanx and how it continues with the cartilage of the phalanx to cradle the metatarsal head (dorsal view).



Figure 2. Detailed view of the plantar plate's anchorage to the base of the proximal phalanx through two slips with a central synovial recess.



Figures 3. A (sagittal) and B (transverse). Schematic view of the plantar plate, sagittal and transverse, with relevant histological details explaining its mechanical function. The fibers of the plate run longitudinally except in its plantar 1/3, where they run transversely in continuity with the deep transverse intermetatarsal ligament and collateral ligaments. In its most distal zone, the plate's composition changes, "transforming" into a tissue with ligamentous characteristics to anchor to the proximal phalanx.

of the different pathways of the deep transverse intermetatarsal ligament, which anchors to both sides of the flexor plate in its most plantar portion, providing consistency to the entire structure (Figure 3B).

Finally, both the interosseous and lumbrical tendons can also project expansions that continue with the plantar plate^{2,5}.

- **Vascularization:** the vascularization of the plate has also been studied by different researchers. Gregg et al.⁴ established that

the blood supply to the plate is mainly through the peripheral plantar area. More recently, Finney et al.⁸ have conducted several studies using nano-computed tomography, concluding that the central portion of the plate could be a hypovascularized region, which would explain a higher tendency to pathology in that region as well as the difficulties observed in the healing process. In a more recent article by the same research team, it is suggested that the previously described proximal

synovial junction may not simply be a connecting tissue but a pedicle through which around 65 % of the proximal region of the plate is nourished via the metatarsal neck, with significant implications for surgical management⁹.

Mechanical functions of the plantar plate

Analyzing the anatomy and tissue composition of the plantar plate, we can better understand the mechanical functions it performs, which we list below:

- *Plantar reinforcement of the joint capsule*: the metatarsophalangeal joint capsule, well differentiated in its dorsal aspect, fuses with the plantar plate in its plantar aspect, constituting the “floor” of this capsule^{5,10}.
- *Static stabilization of the lesser metatarsophalangeal joints*: as previously mentioned, the plantar plates constitute the distal and insertional region of the plantar fascia, which has important biomechanical implications through the so-called reverse windlass mechanism. This mechanism implies that the ground reaction forces acting on the plantar side of the foot tend to flatten the arch and increase the tension of the plantar fascia, resulting in a plantarflexion moment of the proximal phalanx, where it inserts through the plate, acting as a passive stabilizer of the toes on the ground during weight-bearing activities. This effect is not mediated by any muscular activity (nor, therefore, the CNS) but is directly produced by the disposition and characteristics of the plantar fascia and its insertion at the bases of the proximal phalanges. For this reason, the plantar plates, through the reverse windlass mechanism, are the main passive stabilizers of the toes to allow digital grip¹¹. Following Pauwels’ theory¹² of “causal histogenesis”, collagen fibers always orient themselves in the direction of greatest tension. According to the histological analysis of the plantar plate, most of its fibers are oriented longitudinally in continuity with the fascia fibers, which indicates the design of this structure to primarily resist tensile forces.
- *Prolongation of the phalangeal cartilage and “shock absorber” of the metatarsal head (Figure 4)*: observing the anatomical relationship of the cartilage at the base of the proximal phalanx and that of the metatarsal head, it is easy to discern the size discrepancy between them. To compensate for this lack, the plantar plate continues the cartilage of the phalanx so that it articulates with the metatarsal head¹⁰. However, its fibrocartilaginous composition, a tissue specialized in compressive force support, also suggests that the plantar plate is not simply a prolongation of the cartilage but rather a shock absorber for the compressive forces generated by the metatarsal head during weight-bearing activities¹³.
- *Medio-lateral stability*: the collateral ligaments (proper and accessory) provide stability to the joint, preventing deviation of the toe in the transverse plane (clinodactyly) and, together with the plate, in the sagittal plane (dorsal dislocation). Various authors have studied the importance of the plantar plate-collateral ligament complex in joint stability by performing cadaver studies in which structures are progressively sectioned and the force required to produce displacement or joint dis-



Figure 4. View of the plate, concave in appearance and in continuity with the small cartilage of the proximal phalanx to articulate with the metatarsal head and provide cushioning support during weight-bearing activities.

location is measured. In the study by Bhatia and Myerson¹⁴, the sectioning of the plantar plate reduced by 30 % the force needed to vertically displace the proximal phalanx, while the sectioning of the collateral ligaments reduced it by 46 %. A similar study with a larger sample was conducted by Suero et al¹⁵, determining that the sectioning of the plate reduces stability by 19 %, while the sectioning of the collateral ligaments does so by 37 %. The joint sectioning of both structures resulted in a 63 % reduction in stabilizing force in the sagittal plane. From these studies, we can conclude that the collateral ligaments are the most resistant structures in joint stability, although the anchorage of the accessory collateral ligaments to the plate implies that both structures contribute in unison to this stabilization. Barg et al. reached this same conclusion in their 2012 study¹³. In 2016, Maas et al. published a systematic review on this issue, gathering information from the referenced studies¹⁶. Among their conclusions, they emphasized that, since these studies were conducted on anatomical specimens with acute lesions, the knowledge derived from these experiments may not be a true reflection of clinical situations for chronic injuries (most of the cases we attend in consultation), where the biological healing processes play a relevant role not considered in the conclusions of these studies.

Etiological factors associated with plantar plate pathology

The plantar plate of the second metatarsophalangeal joint is, by far, the most frequently injured. Between 67 % and 90 % of plantar plate tears occur in the second metatarsophalangeal joint, according

to some studies^{17,18}. In most cases, they tend to be chronic degenerative tears in middle-aged and elderly women. Acute or traumatic tears, although possible, are less common and generally confined to young patients with moderate to intense sports activity and repetitive or acute trauma¹⁹.

Various authors have evaluated the etiological factors most related to plantar plate pathology. In 2012, Klein conducted a study to correlate radiological findings with patients undergoing surgery for suspected flexor plate rupture. A sample of 106 feet was obtained, in which 97 of them confirmed the rupture of the flexor plate intraoperatively²⁰. Of all the variables studied in the preoperative X-rays of these patients, the separation between the second and third toes (splaying toe) and metatarsal protrusion greater than 2 mm were the variables most correlated with feet with plantar plate injury.

In 2016, Fleischer²¹ et al. conducted a retrospective case-control study on 100 patients with pathology vs. 200 healthy patients, establishing that a long second metatarsal (metatarsal protrusion index > 4 mm according to Nilsson's methodology) is the main risk factor for the development of plantar plate injuries. Other variables studied that were not statistically significant included body mass index, smoking, presence or absence of hallux valgus, intermetatarsal angle, and Seiberg index. However, variables of interest such as the type of usual footwear or level of physical activity were not considered in this study. It is generally accepted that narrow and high-heeled shoes are a predisposing factor as they cause chronic hyperextension forces in the metatarsophalangeal joints, predisposing to the elongation and tearing of the plantar plate^{19,21}.

The results of the previous study were also corroborated by Mann in 2021²². In this case, 211 feet were retrospectively analyzed using magnetic resonance imaging to determine the degree of plantar plate injury and conventional X-ray to measure the metatarsal protrusion index following Coughlin's methodology. The conclusion of this study was similarly that there is a correlation between second metatarsal protrusion (> 5 mm) and plantar plate injury.

Local corticosteroid infiltrations have also been reported as a factor that can trigger the complete rupture of the plantar plate. Although there are no studies to support this statement, there are several case reports where the use of infiltrations was associated with subsequent joint dislocation²³.

Exploration and clinical presentation

For many years, various authors from different disciplines (podiatry, traumatology, physiotherapy, etc.) have referred to frequent cases of inflammatory and incapacitating processes that appear non-traumatic and without systemic involvement of the metatarsophalangeal joints²⁴. This has led to varied nomenclature until, in 2002, Gerard Yu published his article²⁵, a classic in our discipline, establishing a relationship of events between the progressive damage of the flexor plate and adjacent structures and the dislocation of the second toe (crossover toe), unifying this timeline of events into a pathology he called the predislocation syndrome of the metatarsophalangeal joints; a term more accepted and used today.

The most common clinical presentation in the initial stages occurs in middle-aged women with focal, acute, or subacute pain on the plantar side of the affected joint. This pain has mechanical char-

acteristics, subsides with rest, and patients may perceive it as a mass they are stepping on. Occasionally, edema can be seen dorsally with a loss of the contour of the extensor tendons, although the peak of pain upon palpation is usually plantar and antecapital (base of the proximal phalanx). It is uncommon for hyperkeratosis or heloma to appear at the dorsal interphalangeal level (although it may present erythema) or at the plantar level of the metatarsal head, which distinguishes this entity from the classic claw toe. Some patients may relate the onset of symptoms to a recent increase in activity or the use of specific footwear for a certain period.

Mobility, both passive and active, is usually not compromised in the early stages, and some patients may experience some relief by plantarflexing the toe. The lack of treatment in these early stages can inexorably lead to the progressive dorsal subluxation of the toe, which, in turn, may be accompanied by transverse deviation, generally towards the medial side, suggesting involvement of the lateral collateral ligaments. As one of the functions of the second toe is to slow the development of HAV, when the toe becomes unstable, HAV can progress significantly, resulting in the establishment of an irreversible dislocation with a characteristic crossover toe²⁶.

As mentioned before, the combination of the plantar plate and collateral ligaments is the main passive stabilizer of the metatarsophalangeal joint. The intrinsic musculature (lumbricals and interossei) and the extrinsic musculature (extensors and flexors) act as active stabilizers through a balance of forces that largely depends on the position of the proximal phalanx. When the proximal phalanx progressively adopts a dorsiflexed position, the balance of forces between the extrinsic and intrinsic musculature is altered because the insertion of the interossei and lumbricals migrates above the axis of the joint, losing their plantarflexion mechanical advantage²⁷.

The proximal phalanx can adopt a chronic dorsiflexed position for various reasons and can be a consequence of plantar plate injury or predispose to such an injury. All this leads us to conclude the important role the plantar plate plays as the main stabilizer of the lesser metatarsophalangeal joint.

Clinical tests of interest

Among the clinical tests suggested to evaluate the possible injury of the plantar plate, the "Drawer test" initially proposed by Thompson and Hamilton and the "Paper pull-out test" (digital pressure test) stand out²⁸. While these tests have clinical, academic, and demonstration interest for the patient, the current use of imaging tests such as ultrasound, which allows direct visualization of the structures, greatly simplifies the diagnostic process in correlation with the previously described clinical findings.

In Yu et al. article²⁵, a proposal for the classification of predislocation syndrome into three stages related to clinical findings was also made. These classifications have subsequently been enriched and modified based on anatomical and surgical findings, especially by the team of Caio Nery and Michael Coughlin et al. in successive studies^{29,30}.

While these classifications have evident academic interest, they may not always be precise or easy to establish without imaging tests or intraoperative inspection. Therefore, for the present article, we will focus on ultrasound findings, which we will discuss in the next section.

Sonoanatomy and sonopathology of the plantar plate

Currently, following the recommendations of the European Society of Musculoskeletal Radiology (ESSR), magnetic resonance imaging (MRI) and ultrasound are the two most relevant imaging modalities for the correct imaging diagnosis of plantar plate injuries. Both have a high degree of sensitivity and specificity, leading to a consensus to consider them equivalent in the diagnosis of flexor plate injuries³¹.

Conventional X-rays are also routinely used. Although they do not allow visualization of the plate, they do allow observation of the effects of its injury and the collateral ligaments on bone alignment and are essential in surgical planning when performing procedures such as shortening and/or elevation osteotomies.

The main advantage of ultrasound lies in its immediacy and low cost, and the possibility of visualizing the structure in real time and with dynamic stress maneuvers, which allow a better understanding of the injury mechanism. However, MRI allows greater precision in determining the degree of injury, as well as the additional visualization of other structures of interest, such as collateral ligaments, which cannot be assessed by ultrasound³².

In the last decade, we have seen a very significant increase in publications in this regard^{17,33-36}. In 2021, Catherine McCarthy published a

review article on ultrasound of the plantar plate, which we will use for this review as a reference article³⁷. Thus, regarding ultrasound findings related to plantar plate pathology, we will differentiate between direct and indirect findings.

Examination technique

As in any ultrasound examination, we acquire longitudinal and transverse views (long and short axes). In general, dynamic longitudinal images provide the most information about the integrity of the plate. For this, it is useful to dorsiflex the toe with the passive hand, tensioning the plate, which changes from a curved appearance to a more linear and better-defined aspect.

On the other hand, it is important to perform sweeps in the lateral-medial direction. Tears are most frequently described initially along the lateral insertional band of the plantar plate, with purely central or medial tears being less common and usually appearing when the injury progresses from the lateral band. This is explained because the lesser metatarsals are relatively supinated, and the lateral condyle is positioned more plantarly than the medial condyle, concentrating compressive forces on the lateral band of the plate⁷ (Figure 5). Similarly, this finding corresponds with the tendency of the second toe to deviate medially since the progressive failure in the plate, collateral ligament, and lateral capsule

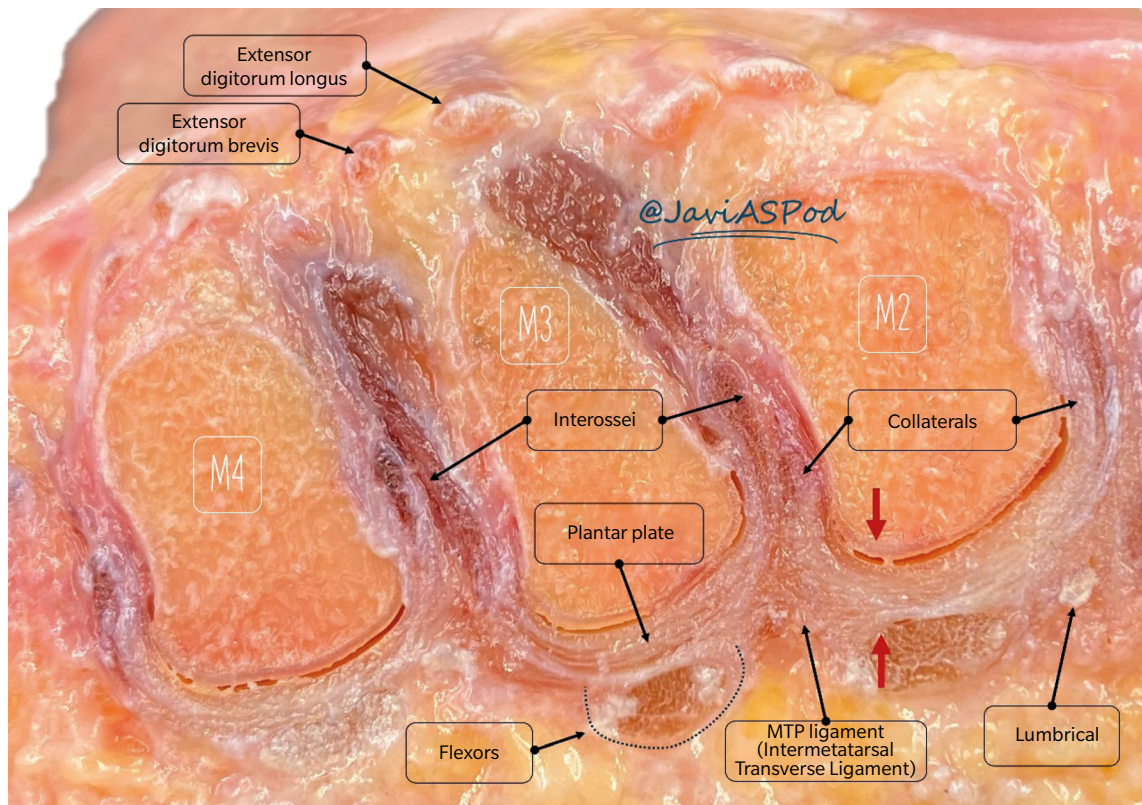


Figure 5. Transverse cut of the metatarsophalangeal joints with the main structures. The supination of the metatarsal is evident, explaining the increased compression on the lateral band of the plantar plate (red arrows are showing the area most frequently injured).

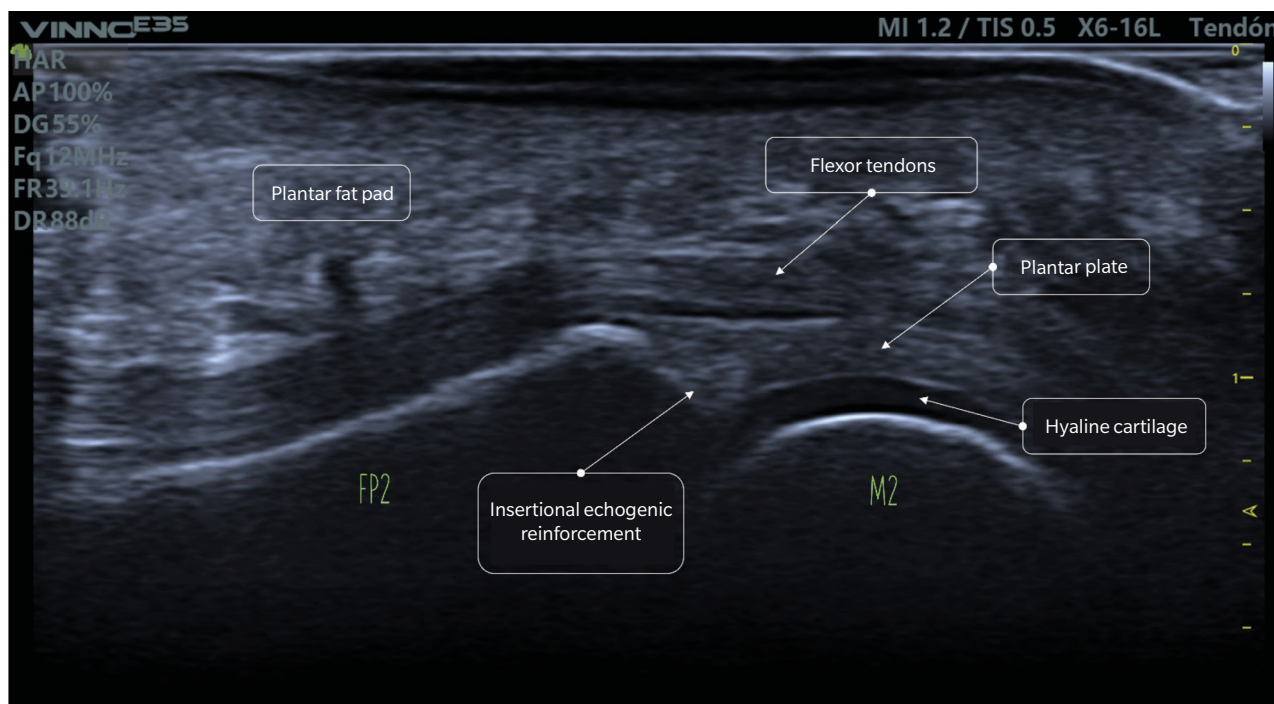


Figure 6. Normal ultrasound image of a plantar plate and other adjacent structures. Longitudinal view (long axis).

favors medial side contracture, predisposing to the formation of the crossover toe³⁸.

Finally, it is always useful to perform comparative ultrasounds with the plantar plate of the contralateral foot when it is asymptomatic, especially if there are doubts about a less conclusive injury during the examination.

Normal criteria for ultrasound images

- *Longitudinal view (long axis):* the normal plantar plate appears on ultrasound as a slightly echogenic curvilinear structure with a homogeneous granular echotexture. This texture allows differentiation, not always well-defined, from the underlying flexor tendons with a fibrillar texture. The articular surface of the plate is precisely defined, bordering the hypoechoic hyaline cartilage of the metatarsal head (Figure 6). At the junction with the proximal phalanx, which is well-defined, the bone contour is usually smooth, and a more echogenic triangular area may appear in the plate, described as a normal ultrasound finding and possibly representing a higher proportion of collagen fibers. The proximal junction with the metatarsal neck, however, has poor definition on the ultrasound image (Figure 6).
- *Transverse view (short axis):* the plantar plate will have a curved shape that cradles the metatarsal head. The echotexture is equally granular, although in this exam, the mottled appearance may be more heterogeneous, reflecting the longitudinal arrangement of collagen bundles. The flexor tendons can be

seen over the plate and can be easily identified using anisotropy maneuvers (Figure 7).

Direct ultrasound findings

Plantar plate tears can show in different ways on ultrasound, affecting the structure partially or completely.

1. *Anechoic or hypoechoic focal defect.* They appear as a discrete cleft in the deep tissue area (the area that articulates with the metatarsal head) on its lateral margin. When the superficial fibers are intact, it is called a partial-thickness tear, while a tear that traverses the entire tissue to its superficial region is called a full-thickness tear³⁹ (Figure 8).
2. *Flattening and attenuation of the plantar plate.* In these cases, a clear defect is not observed, but attention should be paid when the insertion area, usually thicker, appears thinner than the middle or proximal area of the plate. This generally suggests the presence of a transverse tear extending from the lateral portion to the central portion of the plate⁴⁰ (Figure 9).
3. *Non-visualization of the plantar plate.* The non-visualization of the plantar plate may indicate a complete transverse tear with tissue retraction, often associated with dorsal dislocation of the proximal phalanx.

As mentioned, in all cases, dynamic maneuvers to tense the toe (and the plate) are essential to establish the presence and extent of a tear^{41,42}. The inability to tense the plate (transition from a curved to a linear state) and the loss of congruent movement between the proximal phalanx and the plate are

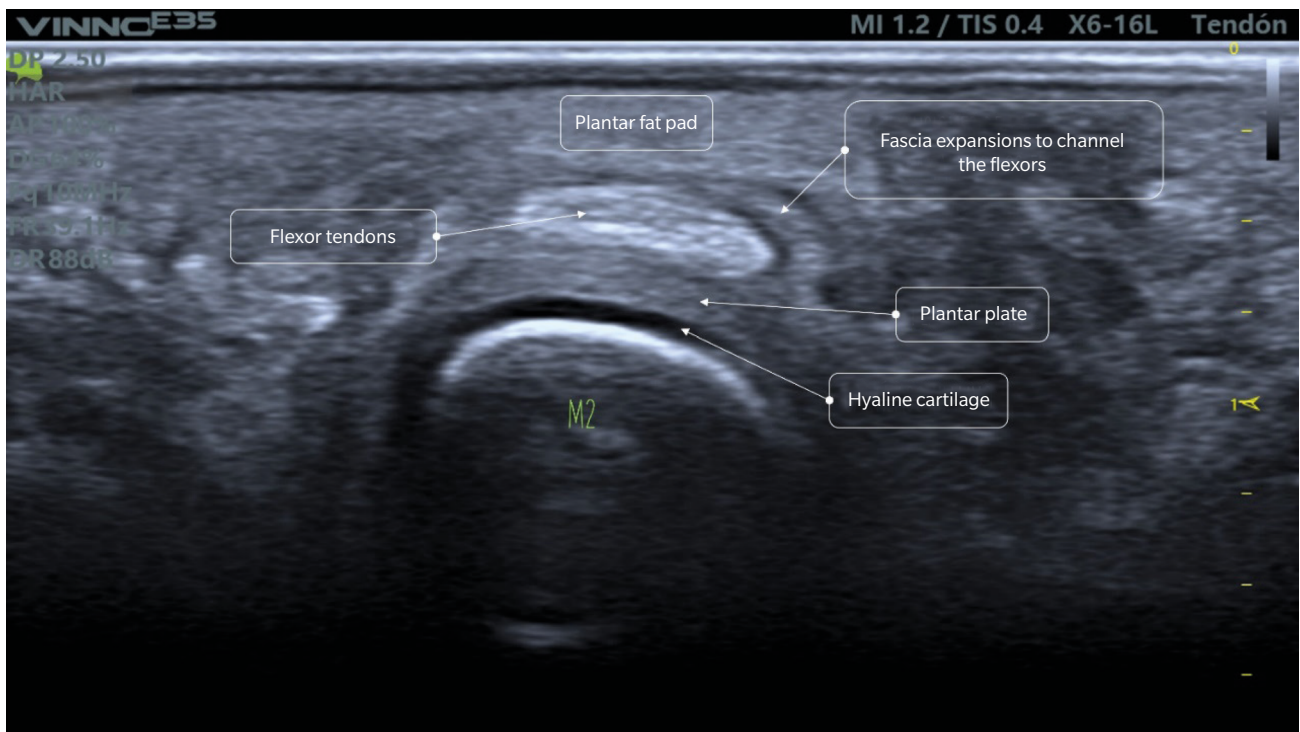


Figure 7. Normal ultrasound image of a plantar plate and other adjacent structures. Transverse view (short axis).

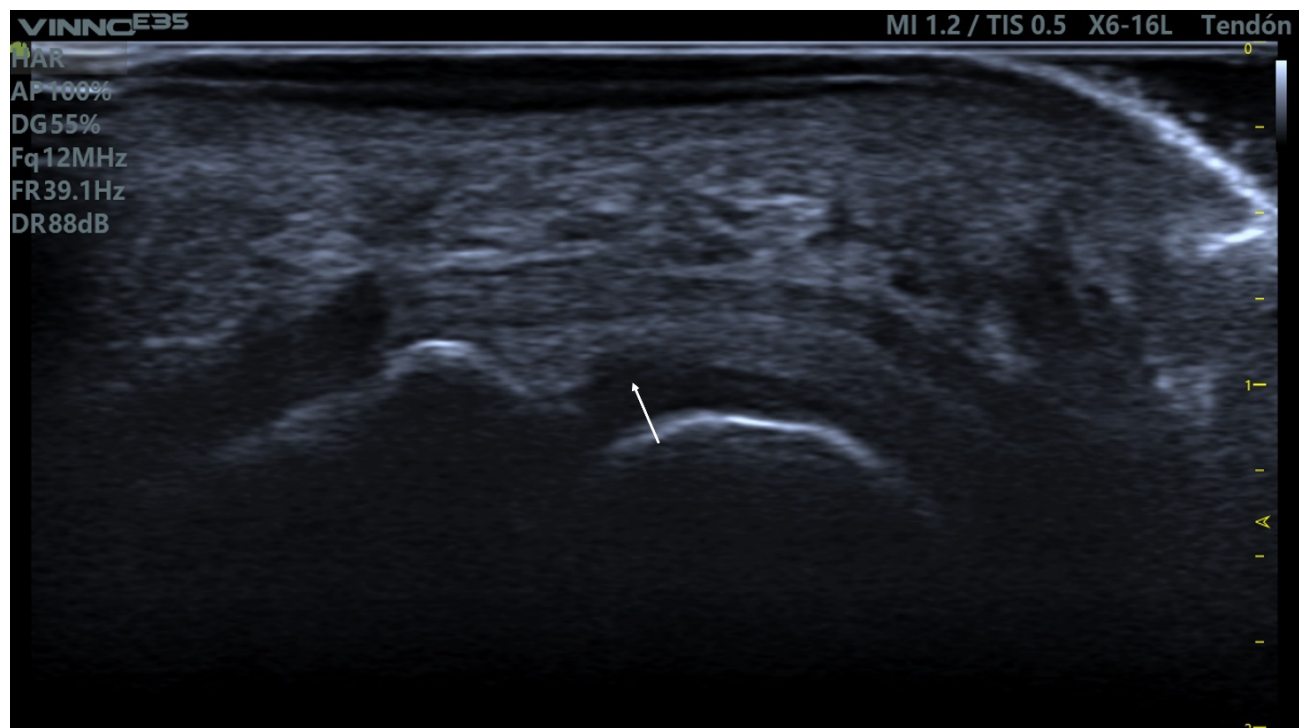


Figure 8. Longitudinal view of anechoic focal defect in the lateral portion suggesting a partial-thickness tear in the plantar plate. Deep location relative to the metatarsal head. The superficial fibers remain intact.

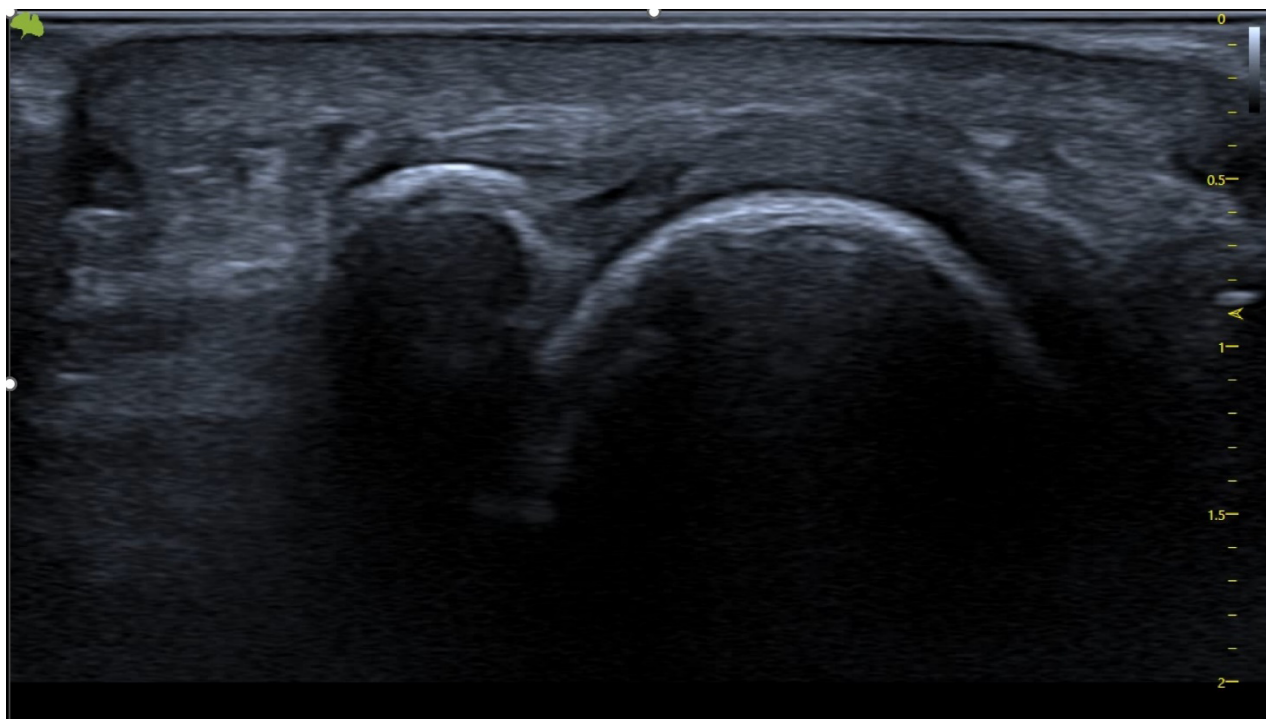


Figure 9. Longitudinal view of extensive longitudinal tear only visible through dynamic dorsal flexion maneuvers of the toe.

very suggestive signs of a tear that can only be appreciated with these maneuvers.

Indirect ultrasound findings

1. *Plantar or dorsal joint fluid (synovitis). Synovial effusion.* Since the plantar plate forms the plantar closure of the joint capsule, tears in the plate can lead to a significant increase in synovial fluid, which manifests as a detectable synovial effusion both dorsally and plantarly. In some cases, this fluid can leak into the flexor tendons, creating a hypoechoic halo around them resembling the characteristic image of tenosynovitis with distension of the tendon sheath (Figure 10).
2. *Bursitis of the plantar fat pad.* In relation to the previous finding, some cases of plantar plate tears may also be accompanied by a hypoechoic infiltrate in the adjacent plantar fat pad. This may be a primary defect due to excessive compression of the fat (compression which is also part of the compressive injury etiology of the plate) or the result of a synovial fluid infiltrate due to capsular rupture extravasation as previously mentioned. It is common in these cases to detect a positive doppler signal (Figure 11).
3. *Echogenic enthesophytes in the proximal phalanx.* In advanced stages, it is common to see marked irregularity of the planar cortex of the proximal phalanx base and the presence of enthesophytes associated with plantar plate tears, similar to other ligaments where traction can cause avulsion of the bone tissue⁴³ (Figure 12).

Conclusions

As a conclusion to this review, we will address a classic debate in our discipline about which forces predominate in plantar plate injuries. As we have seen, the plate is an ultra-specialized tissue, and from its anatomical arrangement and histological composition, we can deduce that it is prepared to withstand both compressive and tensile forces. How or to what extent one predominates over the other will likely depend on the characteristics of each patient.

Arguments in favor of the predominance of compressive forces are based on the fact that the most clearly established etiological factor in the scientific literature is the presence of a long second metatarsal or a short first metatarsal. In both cases, the excess metatarsal protrusion or insufficiency of the first ray increases compressive forces on the head of the second metatarsal. This, in turn, corresponds to a common injury pattern observed in ultrasound: focal lesions in the deep central portion (midsubstance) of the plate on its lateral margin, where the metatarsal condyle compresses more forcefully.

However, in another distinct group of patients, we observe that the injuries tend to be more distal, in the purely ligamentous area of the plate, and associated with irregularities of the phalanx cortex and even bone avulsion injuries and enthesophytes, suggesting a traction injury mechanism and therefore tensile force predominance. Additionally, in many patients, the implementation of plantar flexion splinting of the toe using buddy taping or devices designed for this purpose, neutralizing dorsiflexion forces, results in very significant symptomatic relief.

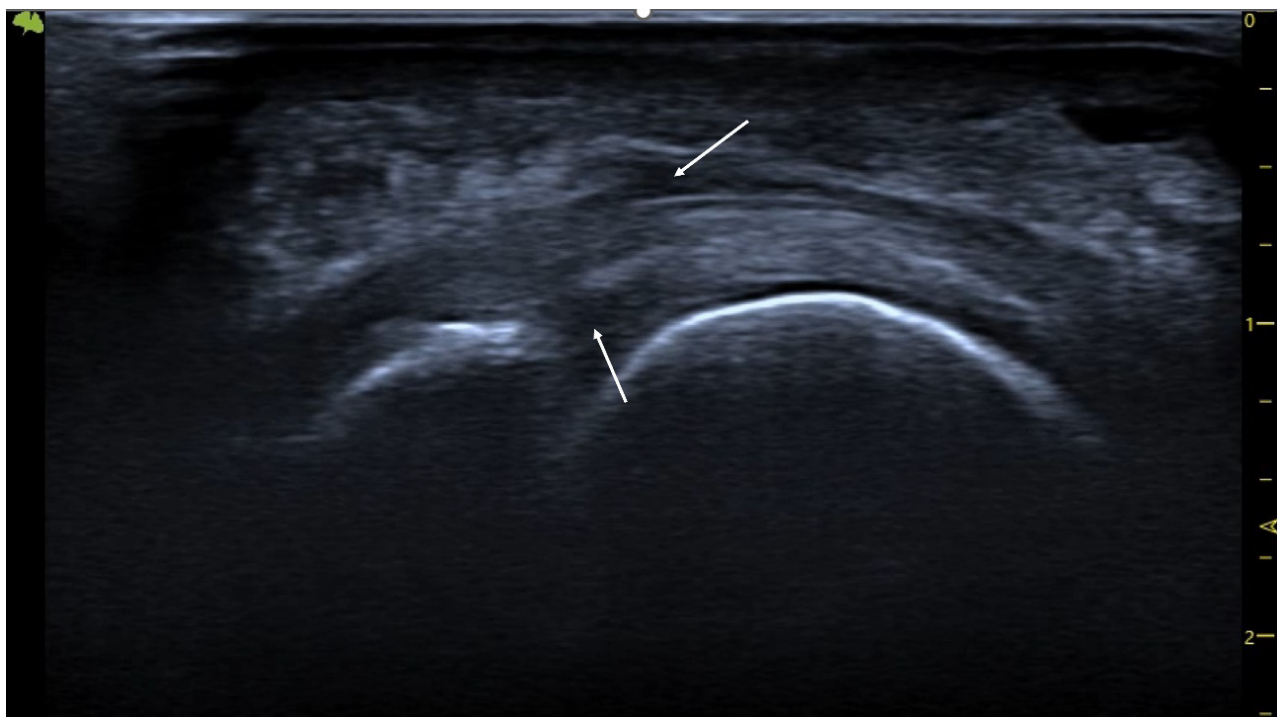


Figure 10. Longitudinal view of full thickness focal defect in the plantar plate with distension of the flexor sheath due to synovial fluid extravasation.

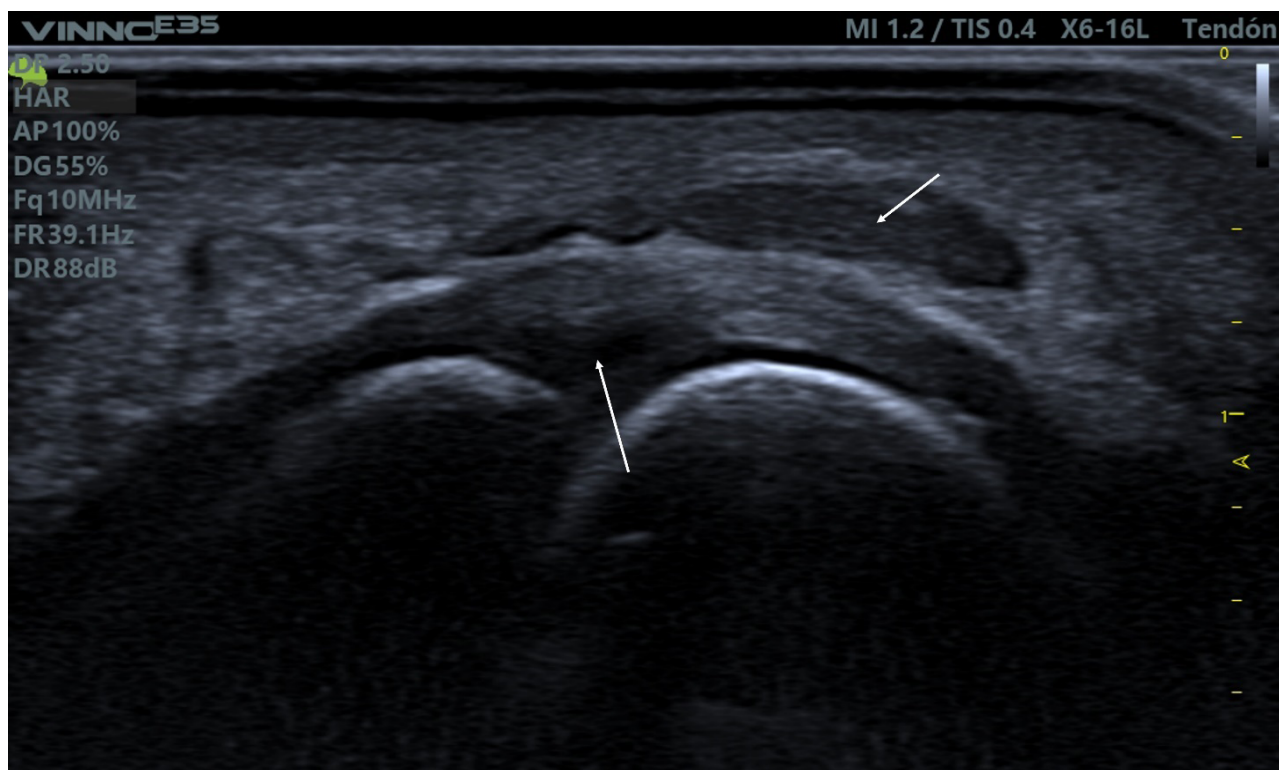


Figure 11. Longitudinal view of bursitis or edema in the subcapital plantar fat pad present as a hypoechoic mass superficial to the flexor tendons, either as a primary cause or due to synovial fluid or extravasation from a plantar plate tear.

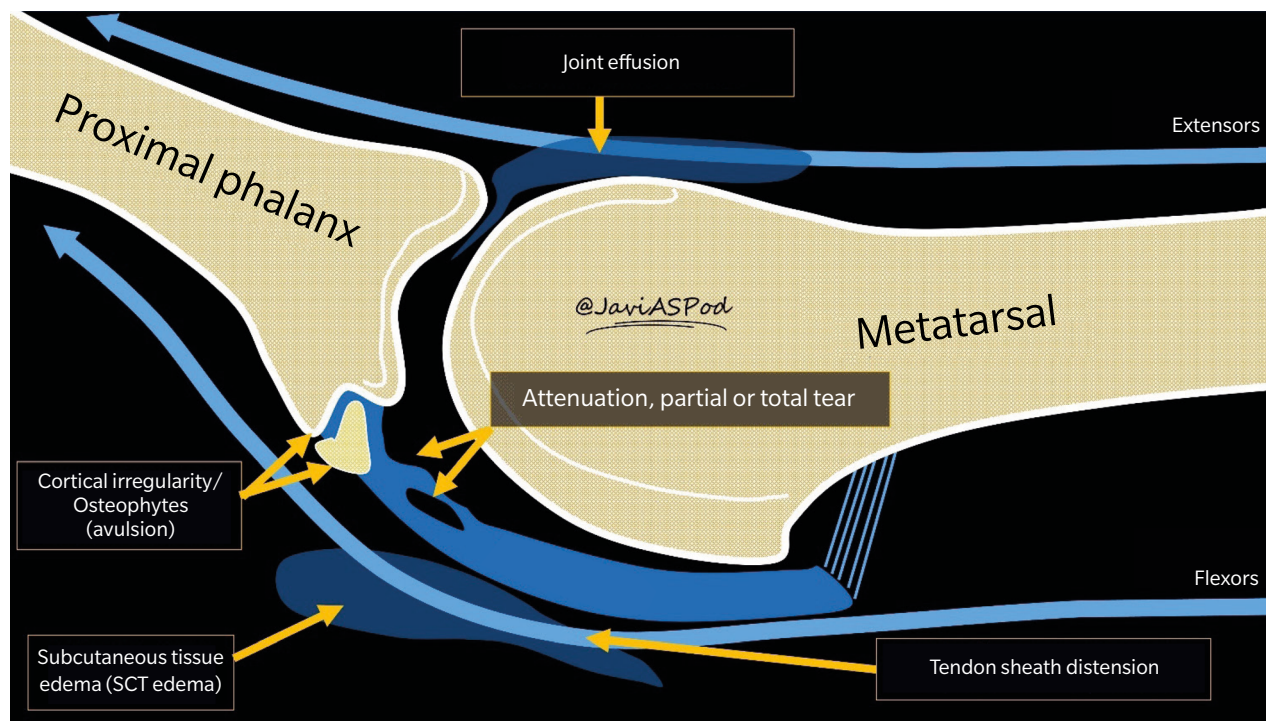


Figure 12. Schematic synthesis of lesions visible by ultrasound in the plantar plate and adjacent tissues in the longitudinal view.

Another factor that has been little studied in this and other pathologies is the loss of competence of the plantar fat pad to absorb and dissipate compressive forces during weight-bearing activities. This could explain why certain injuries on the plantar foot have similar demographic characteristics in terms of their age of onset, which coincides with the time when the plantar fat pad undergoes significant deterioration both quantitatively and qualitatively, thus increasing compressive forces on internal tissues and predisposing them to injury.

Certainly, both tensile and compressive forces contribute in varying proportions depending on each patient's anatomical characteristics and activity level, from which we can deduce whether the injury mechanism is more pronounced in the second or third rocker. It is the clinician's duty to establish the predominance of one or the other to determine the diagnosis based on clinical examination and history. However, at present, with the accessibility of imaging tests such as ultrasound, it is highly advisable to establish the degree of injury and its prognosis to decide the most appropriate treatment in each case.

References

- Deland JT, Lee KT, Sobel M, Dicarlo EF. Anatomy of the Plantar Plate and Its Attachments in the Lesser Metatarsal Phalangeal Joint. *Foot Ankle Int.* 1995;16(8):480-6. DOI: 10.1177/107110079501600804.
- Johnston RB, Daniels T, Smith J. The Plantar Plate of the Lesser Toes: An Anatomical Study in Human Cadavers. *Foot Ankle Int.* 1994;15(5):276-82. DOI: 10.1177/107110079401500508.
- Hatch DJ. Anatomy: Plantar Plate. *Clin Podiatr Med Surg.* 2022;39(3):411-9. DOI: 10.1016/j.cpm.2022.02.004.
- Gregg J, Marks P, Silberstein M, Schneider T, Kerr J. Histologic anatomy of the lesser metatarsophalangeal joint plantar plate. *Surg Radiol Anat.* 2007;29(2):141-7. DOI: 10.1007/s00276-007-0188-2.
- Mohana-Borges AVR, Theumann NH, Pfirrmann CWA, Chung CB, Resnick DL, Trudell DJ. Lesser Metatarsophalangeal Joints: Standard MR Imaging, MR Arthrography, and MR Bursography—Initial Results in 48 Cadaveric Joints. *Radiology.* 2003;227(1):175-82. DOI: 10.1148/radiol.2271020283.
- Kelikian AS, Sarrafian SK. Sarrafian's anatomy of the foot and ankle : descriptive, topographical, functional. 3^a ed. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins (ed); 2011. p. 759.
- Nery C, Baumfeld D, Umans H, Yamada AF. MR Imaging of the Plantar Plate. *Magn Reson Imaging Clin N Am.* 2017;25(1):127-44. DOI: 10.1016/j.mric.2016.08.007.
- Finney FT, McPheters A, Singer NV, Scott JC, Jepsen KJ, Holmes JR, et al. Microvasculature of the Plantar Plate Using Nano-Computed Tomography. *Foot Ankle Int.* 2019;40(4):457-64. DOI: 10.1177/1071100718816292.
- Park JV, Finney FT, Singer NV, Saunders NE, Walley KC, Holmes JR, et al. Proximal Plantar Plate of Lesser Toe Metatarsophalangeal Joint Vascular Supply. *Foot Ankle Int.* 2023;44(1):75-80. DOI: 10.1177/10711007221140043.
- Viladot Voegeli A, Gasch Blas J. La placa plantar. *Rev Pie Tobillo.* 2015;29(1):2-10. DOI: 10.1016/S1697-2198(16)30002-7.
- Kirby KA. Biomecánica del pie y la extremidad inferior V: Artículos de Pre-cisión Intracast. 2014-2018. Smith JJ (ed.). Payson (Arizona): Precision Intracast Inc; 2019. p. 1-157.
- Pauwels F. Biomechanics of the Locomotor Apparatus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1980.
- Barg A, Courville XF, Nickisch F, Bachus KN, Saltzman CL. Role of collateral ligaments in metatarsophalangeal stability: A cadaver study. *Foot Ankle Int.* 2012;33(10):877-82. DOI: 10.3113/FAI.2012.0877.

14. Bhatia D, Myerson MS, Curtis MJ, Cunningham BW, Jinnah RH. Anatomical restraints to dislocation of the second metatarsophalangeal joint and assessment of a repair technique. *J Bone Joint Surg.* 1994;76(9):1371-5. DOI: 10.2106/00004623-199409000-00012.
15. Suero EM, Meyers KN, Bohne WHO. Stability of the metatarsophalangeal joint of the lesser toes: A cadaveric study. *J Orthop Res.* 2012;30(12):1995-8. DOI: 10.1002/jor.22173.
16. Maas NMG, van der Grinten M, Bramer WM, Kleinrensink GJ. Metatarsophalangeal joint stability: A systematic review on the plantar plate of the lesser toes. *J Foot Ankle Res.* 2016;9:32. DOI: 10.1186/s13047-016-0165-2.
17. Umans H, Srinivasan R, Elsinger E, Wilde GE. MRI of lesser metatarsophalangeal joint plantar plate tears and associated adjacent interspace lesions. *Skeletal Radiol.* 2014;43(10):1361-8. DOI: 10.1007/s00256-014-1920-8.
18. Nery C, Coughlin MJ, Baumfeld D, Mann TS. Lesser metatarsophalangeal joint instability: Prospective evaluation and repair of plantar plate and capsular insufficiency. *Foot Ankle Int.* 2012;33(4):301-11. DOI: 10.3113/FAI.2012.0301.
19. Linklater JM, Bird SJ. Imaging of Lesser Metatarsophalangeal Joint Plantar Plate Degeneration, Tear, and Repair. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2016;20(2):192-204. DOI: 10.1055/s-0036-1581115.
20. Klein EE, Weil L, Weil LS, Knight J. The Underlying Osseous Deformity in Plantar Plate Tears: A Radiographic Analysis. *Foot Ankle Spec.* 2013;6(2):108-18. DOI: 10.1177/1938640012463060.
21. Weil L, Fleischer AE, Klein EE, Ahmad M, Shah S, Catena F, et al. Association of Abnormal Metatarsal Parabola with Second Metatarsophalangeal Joint Plantar Plate Pathology. *Foot Ankle Int.* 2017;38(3):289-97. DOI: 10.1177/1071100716674671.
22. Mann TS, Nery C, Baumfeld D, Fernandes EA. Is second metatarsal protrusion related to metatarsophalangeal plantar plate rupture? *Am J Roentg.* 2021;216(1):132-40. DOI: 10.2214/AJR.19.22563.
23. Ito E, Shima H, Toge K, Hirai Y, Tsujinaka S, Yasuda T, et al. Dislocations of the second and third metatarsophalangeal joints after local steroid injection in patients with refractory metatarsalgia: A case report. *SAGE Open Med Case Rep.* 2021;9:2050313X211046744. DOI: 10.1177/2050313X211046744.
24. Mann RA, Mizel MS. Monarticular Nontraumatic Synovitis of the Metatarsophalangeal Joint: A New Diagnosis? *Foot Ankle.* 1985;6(1):18-21. DOI: 10.1177/107110078500600104.
25. Yu GV, Judge MS, Hudson JR, Seidelmann FE. Predislocation Syndrome Progressive Subluxation/Dislocation of the Lesser Metatarsophalangeal Joint. *JAPMA.* 2002;92(4):182-99.
26. Butterworth ML, Block AJ. Update on Fibrocartilaginous Disease Clinical Examination. *Clin Podiatr Med Surg.* 2022;39(3):371-92. DOI: 10.1016/j.cpm.2022.03.002.
27. Dalmau-Pastor M, Fargues B, Alcolea E, Martínez-Franco N, Ruiz-Escobar P, Vega J, et al. Extensor apparatus of the lesser toes: Anatomy with clinical implications - Topical review. *Foot Ankle Int.* 2014;35(10):957-69. DOI: 10.1177/1071100714546189.
28. Doty JF, Coughlin MJ, Weil L, Nery C. Etiology and management of lesser toe metatarsophalangeal joint instability. *Foot Ankle Clin.* 2014;19(3):385-405. DOI: 10.1016/j.fcl.2014.06.013.
29. Nery C, Coughlin M, Baumfeld D, Raduan F, Mann TS, Catena F. How to classify plantar plate injuries: parameters from history and physical examination. *Rev Bras Ortop (English Edition).* 2015;50(6):720-8. DOI: 10.1016/j.rboe.2015.10.009.
30. Nery C, Umans H, Baumfeld D. Etiology, Clinical Assessment, and Surgical Repair of Plantar Plate Tears. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2016;20(2):205-13. DOI: 10.1055/s-0036-1581114.
31. Sconfienza LM, Albano D, Allen G, Bazzocchi A, Bignotti B, Chianca V, et al. Clinical indications for musculoskeletal ultrasound updated in 2017 by European Society of Musculoskeletal Radiology (ESSR) consensus. *Eur Radiol.* 2018;28(12):5338-51. DOI: 10.1007/s00330-018-5474-3.
32. Albright RH, Brooks BM, Chingre M, Klein EE, Weil LS, Fleischer AE. Diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging (MRI) versus dynamic ultrasound for plantar plate injuries: A systematic review and meta-analysis. *Eur J Radiol.* 2022;152:110315. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110315.
33. Dinoá V, von Ranke F, Costa F, Marchiori E. Evaluation of lesser metatarsophalangeal joint plantar plate tears with contrast-enhanced and fat-suppressed MRI. *Skeletal Radiol.* 2016;45(5):635-44. DOI: 10.1007/s00256-016-2349-z.
34. Hulstaert T, Shahabpour M, Provyn S, Lenchik L, Simons P, Vanheste R, et al. Forefoot Pain in the Lesser Toes: Anatomical Considerations and Magnetic Resonance Imaging Findings. *Can Assoc Radiol J.* 2019;70(4):408-15. DOI: 10.1016/j.carj.2019.06.010.
35. Mann TS, Nery CA de S, Baumfeld D, Fernandes E de Á. Degenerative injuries of the metatarsophalangeal plantar plate on magnetic resonance imaging: a new perspective. *Einstein (Sao Paulo).* 2022;20:eAO6543. DOI: 10.31744/einstein_journal/2022AO6543.
36. Reijnierse M, Griffith JF. High-resolution ultrasound and MRI in the evaluation of the forefoot and midfoot. *J Ultrason.* 2023;23(95):249-69. DOI: 10.15557/JoU.2023.0033.
37. McCarthy CL, Thompson G V. Ultrasound findings of plantar plate tears of the lesser metatarsophalangeal joints. *Skelet Radiol.* 2021;50(8):1513-25. DOI: 10.1007/s00256-020-03708-1.
38. Carlson RM, Dux K, Stuck RM. Ultrasound Imaging for Diagnosis of Plantar Plate Ruptures of the Lesser Metatarsophalangeal Joints: A Retrospective Case Series. *J Foot Ankle Surg.* 2013;52(6):786-8. DOI: 10.1053/j.jfas.2013.05.009.
39. Stone M, Eyler W, Rhodenizer J, Van Holsbeeck M. Accuracy of sonography in plantar plate tears in cadavers. *J Ultrasound Med.* 2017;36(7):1355-61. DOI: 10.7863/ultra.16.06067.
40. Yamada AF, Crema MD, Nery C, Baumfeld D, Mann TS, Skaf AY, et al. Second and third metatarsophalangeal plantar plate tears: Diagnostic performance of direct and indirect MRI features using surgical findings as the reference standard. *Am J Roentgen.* 2017;209(2):W100-8. DOI: 10.2214/AJR.16.17276.
41. Feuerstein CA, Weil L, Weil LS, Klein EE, Fleischer A, Argerakis NG. Static Versus Dynamic Musculoskeletal Ultrasound for Detection of Plantar Plate Pathology. *Foot Ankle Spec.* 2014;7(4):259-65. DOI: 10.1177/1938640014537300.
42. Donegan RJ, Stauffer A, Heaslet M, Poliskie M. Comparing Magnetic Resonance Imaging and High-Resolution Dynamic Ultrasonography for Diagnosis of Plantar Plate Pathology: A Case Series. *J Foot Ankle Surg.* 2017;56(2):371-4. DOI: 10.1053/j.jfas.2016.11.009.
43. Hodes A, Umans H. Metatarsalgia. *Radiol Clinics.* 2018;56(6):877-92. DOI: 10.1016/j.rcl.2018.06.004.