



Contents lists available at ScienceDirect

Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología

journal homepage: www.elsevier.es/rot

Premios Fundación SECOT

Estudio biomecánico en cadáver del ligamento calcaneonavicular en el colapso de la columna medial del mediopié comparando 2 técnicas quirúrgicas

M. Muñoz de la Espada López ^{a,*}, M.Á. Mellado Romero ^b, A. Abarquero-Diezhandino ^{c,d},
A. Núñez García ^e, E.J. Salvador González ^f, I. Palermo Buzón ^g, L.A. Coraspe Falcón ^h,
M.T. Vázquez Osorio ⁱ, F. Guerra Pinto ^{j,k,l} y J. Vilá y Rico ^{m,n,o}

^a Hospital Universitario de Móstoles, Móstoles, Madrid, España^b Unidad de Pie y Tobillo, Hospital Universitario 12 de Octubre, Madrid, España^c Unidad de Pie y Tobillo, Hospital Universitario Fundación Jiménez Díaz, Madrid, España^d Departamento de Anatomía, Histología y Neurociencia, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España^e Unidad de Pie y Tobillo, Hospital Universitario General de Villalba, Collado Villalba, Madrid, España^f Hospital Universitario de Móstoles, Móstoles, Madrid, España^g Hospital Asepeyo Coslada, Coslada, Madrid, España^h Hospital Universitario de Móstoles, Móstoles, Madrid, Españaⁱ Departamento de Anatomía y Embriología Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España^j Departamento de Ortopedia, Hospital de Sant'Ana, Parede, Portugal^k Departamento de Ortopedia, Hospital da Cruz Vermelha, Lisboa, Portugal^l NOVA Medical School, Facultad de Ciencias Medicas, Nueva Universidad de Lisboa, Lisboa, Portugal^m Unidad de Pie y Tobillo, Hospital Universitario 12 de Octubre, Madrid, Españaⁿ Cirugía Ortopédica y Traumatología, Complejo Hospitalario Ruber Juan Bravo, Madrid, España^o Facultad de Medicina, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Palabras clave:

Inestabilidad del ligamento spring
Pie plano
Deformidad progresiva del pie colapsado
Biomecánica
Reconstrucción

RESUMEN

Introducción: El ligamento calcaneonavicular (*spring ligament*) juega un papel fundamental en la estabilidad estática calcaneonavicular y el arco longitudinal medial, cuya lesión se relaciona con el pie plano.

Objetivo: El objetivo principal fue comparar el comportamiento biomecánico del ligamento calcaneonavicular en un pie sano, y tras la sección y reparación con aumentación y transferencia del flexor común de los dedos (FCD). Como objetivos secundarios estudiamos la comparación biomecánica entre la reparación aislada con aumentación asociando o no la transferencia.

Material y método: Este estudio biomecánico experimental en cadáver evalúa el complejo medial en 4 fases: tobillo intacto (1); lesión del ligamento calcaneonavicular (2); reparación y aumentación (3), y tras la transferencia del FCD (4). Se mide el desplazamiento angular talonavicular en los 3 planos del espacio mediante un artrómetro, aplicando maniobras manuales de exploración del ligamento de calcaneonavicular.

Resultados: Se encontraron diferencias significativas una vez seccionado el ligamento con la maniobra de abducción y rotación externa en los planos coronal ($p = 0,050$) y sagital ($p = 0,045$). Al realizar la aumentación, hubo significación en el plano horizontal ($p = 0,047$) y tras la transferencia del FCD en el plano horizontal ($p = 0,002$). Sin embargo, no se identificaron diferencias significativas entre la reparación y aumentación y la transferencia del FCD.

Conclusión: La sección del ligamento generó inestabilidad en el plano coronal y sagital con movimientos de abducción y rotación externa. Cabe destacar que ambas técnicas quirúrgicas lograron restaurar la estabilidad articular, incluso superando la alcanzada con el ligamento intacto.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: Marietamel1996@gmail.com (M.M. de la Espada López).<https://doi.org/10.1016/j.recot.2025.06.016>

Recibido el 16 de marzo de 2025; Aceptado el 26 de junio de 2025

On-line xxx

1888-4415/© 2025 SECOT. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

A B S T R A C T

Keywords:

Spring ligament instability
Flatfoot
Progressive collapsing foot deformity
Biomechanics
Reconstruction

Introduction: The calcaneonavicular ligament (spring ligament) plays a fundamental role in calcaneonavicular static stability and medial longitudinal arch, injury which is related to flatfoot.

Objective: The primary objective was to compare the biomechanical behaviour of the spring ligament in a healthy foot and after section and repair with augmentation and transfer of the flexor digitorum longus (FDL). As secondary objectives we have the biomechanical comparison between isolated repair with augmentation associated or not with transfer.

Methods: This experimental biomechanical cadaver study evaluates the medial complex in four phases: intact ankle (1); spring injury (2); repair and augmentation (3), and after FDL transfer (4). Talonavicular angular displacement was measured in the three planes of space using an arthrometer and manual spring ligament exploration manoeuvres.

Results: Significant differences were found after sectioning the ligament with the abduction and external rotation manoeuvre in the coronal ($P = .050$) and sagittal ($P = .045$) planes. Upon augmentation, there was significance in the horizontal plane ($P = .047$) and after FDL transfer in the horizontal plane ($P = .002$). However, no significant differences were identified between repair and augmentation and FDL transfer.

Conclusion: Ligament section generated instability in the coronal and sagittal plane with abduction and external rotation movements. It should be noted that both surgical techniques were able to restore joint stability, even surpassing that achieved with the ligament intact.

Introducción

Recientemente se han producido importantes cambios en lo que se refiere a la etiopatogenia, al concepto y a la clasificación del pie plano adquirido del adulto, siendo un tema que genera gran controversia. En la actualidad, este término ha quedado obsoleto, siendo reemplazado por la denominación 'Deformidad Colapsante Progresiva del Pie' (PCFD, por sus siglas en inglés)¹. Esta nueva nomenclatura pone un énfasis más preciso en el carácter progresivo, multifactorial y multiplanar de la deformidad, reconociendo el papel primordial de los tejidos blandos y la correcta alineación del mediopié, retropié y tobillo en el desarrollo de la afección². La clasificación de Johnson y Strom, propuesta en 1989, sentó las bases para entender la deformidad como una consecuencia directa de la disfunción y eventual rotura del tendón tibial posterior. Si bien esta visión fue ampliada posteriormente por autores como Myerson en 1997 y Bluman en 2007, el modelo continuaba basándose en una progresión lineal de estadios, sin considerar adecuadamente la complejidad real de la afección. Con el tiempo, se ha hecho evidente que las deformidades del pie plano del adulto no siempre evolucionan de forma secuencial, y que distintos compartimentos del pie y del tobillo pueden verse afectados de manera simultánea o independiente. Esta comprensión más matizada ha impulsado la necesidad de una nueva nomenclatura que permitiera una descripción más precisa y funcional de los hallazgos clínicos y radiográficos, sin limitarse a una clasificación rígida por estadios³.

Aunque en general se ha aceptado que la disfunción del tibial posterior era la causa fundamental del desarrollo del colapso progresivo del pie plano por su importante papel como estabilizador dinámico, se trata de una concepción muy simplista, naciendo la concepción tridimensional de la deformidad por la cual se entiende que el desarrollo del colapso es mucho más que la rotura del tibial posterior⁴⁻⁷. El ligamento calcaneonavicular está implicado directamente como elemento cinético conductor, facilitando el movimiento y conexión del retropié con el antepié. Este papel funcional ha cobrado relevancia los últimos años, reconociéndose el potencial de estabilización del arco longitudinal medial contribuyendo a mantener su estructura y estabilizar de manera estática la cabeza del astrágalo y la articulación talonavicular en las distintas fases de la marcha^{8,9}.

El ligamento calcaneonavicular o ligamento en *spring* (SL) es una unidad compleja que consta de 3 componentes principales, incluyendo los ligamentos calcaneonavicular inferopltar, medioptar y superomedial¹⁰. La sospecha clínica de una lesión aislada del ligamento calcaneonavicular surge cuando hay dolor persistente en la parte medial del pie. El mecanismo típico que genera dicha lesión es el aterrizaje

y evasión del retropié que deriva en una deformidad unilateral⁹. Por otro lado, estudios anatómicos recientes sugieren que los ligamentos calcaneonavicular y deltoideo no son entidades anatómicas aisladas, sino que más bien forman un gran complejo ligamentoso, el ligamento tibio-calcaneonavicular o *tibiospring* que actúa como una unidad funcional, conservando cada uno su función específica. El ligamento deltoideo proporciona las restricciones principales contra la inclinación en valgo tibiotalar y rotación externa del astrágalo.

El papel del ligamento calcaneonavicular en el desarrollo del colapso de la columna medial y el hundimiento talonavicular ha sido escasamente estudiado, siendo los últimos estudios biomecánicos, los que nos arrojan información sobre la importancia del ligamento calcaneonavicular en el mantenimiento del arco plantar y la restricción de la pronación en las distintas fases de la marcha^{9,11,12}.

Técnicas reconstructivas como la reparación y aumentación con dispositivos de alta resistencia, así como las transferencias, han sido progresivamente añadidas al algoritmo de actuación del pie plano flexible. Convirtiéndose en un gesto añadido a técnicas clásicas como el deslizamiento medial del calcáneo o alargamientos de la columna lateral^{5,13,14}.

Con este estudio se buscó comparar el comportamiento biomecánico del ligamento calcaneonavicular en un pie sano y tras la sección y reparación con aumentación y transferencia del flexor común de los dedos (FCD). Así como la comparación entre ambas técnicas de reparación, de manera aislada con la aumentación y asociando la transferencia.

Justificación del estudio

En este estudio se busca evaluar el impacto biomecánico del ligamento calcaneonavicular plantar, con un énfasis particular en su contribución a la estabilidad de la articulación talonavicular y en las implicaciones de las técnicas de reparación empleadas para lograr resultados biomecánicamente comparables a los de un ligamento intacto. Esta idea concuerda con las inquietudes de numerosos autores previos que ya plantearon que la reconstrucción del ligamento calcaneonavicular aumentaría la corrección alcanzada por los procedimientos de realineación ósea⁴.

A partir de estas consideraciones, se plantea como hipótesis que el estudio del comportamiento biomecánico del pie sano, tras la sección y posterior reconstrucción del ligamento calcaneonavicular, permitirá valorar su papel en la estabilidad articular y la eficacia de las técnicas quirúrgicas aplicadas. Los objetivos de este trabajo son describir la importancia del ligamento calcaneonavicular en la estabilidad de las articulaciones tibiotalar y subtalar, así como detallar la técnica quirúrgica

gica de aumento ligamentario y la transferencia tendinosa del FCD como estrategia de reconstrucción funcional.

Material y métodos

Se realizó un estudio experimental comparativo en cadáver a tiempo cero, en el cual se valoraron 2 técnicas quirúrgicas destinadas al tratamiento de la PCFD, por un lado, la reparación y la aumentación del ligamento calcaneonavicular, y por otro, la transferencia del FCD.

Descripción de la muestra

El estudio fue realizado utilizando 25 piezas anatómicas de tobillos congelados, provenientes del Centro de Donación de Cadáveres de la Universidad Complutense de Madrid. Todas las piezas fueron obtenidas conforme al protocolo establecido por dicho centro.

Para la selección de las piezas, se aplicaron criterios de exclusión, tales como la presencia de antecedentes de cirugías previas, enfermedades reumáticas o tumorales, rigidez articular o deformidades significativas que pudieran interferir con la adecuada ejecución del estudio. Finalmente, se incluyeron 25 tobillos, de los cuales 12 correspondían al lado derecho y 13 al lado izquierdo, distribuidos entre 13 piezas de sexo femenino y 12 de sexo masculino. La muestra obtuvo una edad media de 74,08 años, con una mediana de 73 años, siendo el rango de edad de los participantes entre 52 y 95 años.

Para la estimación del tamaño muestral se fijó un nivel de confianza del 95% y un error de estimación máximo de 0,2. Empleando la fórmula de poblaciones infinitas $n = (Z_{\alpha/2} PQ) / e^2$, obtuvimos una muestra necesaria de 25 piezas cadavéricas.

El estudio se basó en analizar la estabilidad a nivel de la articulación talonavicular tras las 2 técnicas quirúrgicas previamente mencionadas, las cuales buscan en último término recuperar la función del ligamento calcaneonavicular. Para este análisis se realizaron 4 maniobras exploratorias entre las que se encontraba la abducción/rotación externa, pronación, flexión plantar y carga axial.

Estas maniobras se realizaron en las 4 fases consecutivas del estudio: Integridad del ligamento calcaneonavicular (1); Sección del ligamento del ligamento calcaneonavicular (2); Reparación y aumentación del ligamento calcaneonavicular (3), y Transferencia del FCD (4). Comparándose la efectividad de estas 2 últimas técnicas, las cuales se realizaron de manera secuencial.

Preparación del estudio

Se realizó inicialmente una estabilización de la pieza cadavérica mediante una mordaza anclada a la tibia distal permitiendo la movilidad individualizada del pie y tobillo. Era necesaria la inserción de 2 agujas de Kirschner en el cuerpo del hueso navicular para realizar una conexión rígida y medir los grados de movilidad en los 3 ejes del espacio. Todas las piezas a estudio fueron diseccionadas y analizadas por un mismo examinador, intentando reducir la variabilidad intraobservador.

Inicialmente se estableció para el artrómetro un punto de partida neutro tras el cual recogimos un valor de referencia sin aplicar ninguna fuerza. Una vez obtenidos los valores tras la movilidad, realizamos una diferencia entre ambos datos para obtener los ángulos de desplazamiento definitivos. Cada medición fue tomada 3 veces obteniendo una media final de los 3 valores en busca de una mayor precisión. Todas las maniobras fueron realizadas por el mismo operador con experiencia para minimizar la variabilidad. Aun así, siendo conscientes de la posible variación en la fuerza aplicada en estudios con exploración manual, se calculó un coeficiente de correlación intraclase (ICC) que demostró una alta reproducibilidad entre las mediciones, aportando solidez y consistencia a los datos obtenidos.

Se llevaron a cabo 4 maniobras realizadas manualmente para determinar la estabilidad articular talonavicular: Abducción y rotación externa (1); pronación y eversion (2); colapso y flexión plantar (3), y

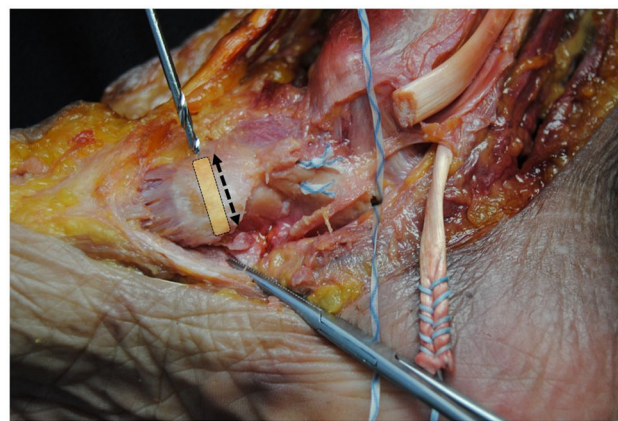


Figura 1. Se observa la reparación del ligamento de Spring con sutura de alta resistencia, la fijación del implante tipo SwiveLock® de 3,5 mm (Arthrex, Naples, FL, EE. UU.) cargado con el FiberTape® a nivel del sustentaculum tali y el inicio de la tunelización a nivel del navicular.

carga axial (4), la cual fue realizada con un soporte externo que forzaba la posición plantigrada.

El prototipo cuantificó rotaciones en los planos del espacio (axial, coronal y sagital) tras la realización de estas maniobras.

En el plano axial, los movimientos de rotación externa se definieron con valores positivos, mientras que los de rotación interna se representaron con valores negativos. En el plano coronal, los movimientos de supinación/inversión fueron asignados valores positivos, y los de pronación/eversión, valores negativos. Por último, en el plano sagital, se establecieron valores positivos para los movimientos de flexión plantar y valores negativos para los de flexión dorsal.

Protocolo de trabajo

En primer lugar, se realizó un abordaje sobre la columna medial identificando el ligamento de calcaneonavicular, así como el FCD, flexor propio del primer dedo y el tibial posterior. Se realizó una sección del ligamento calcaneonavicular simulando la lesión más frecuente encontrada en la PCFD. Para ello, se accedió mediante abordaje medial y se identificó la estructura correspondiente al ligamento en hamaca, que fue seccionada cuidadosamente con bisturí frío. La sección se centró en el fascículo superomedial, principal responsable de la estabilización del arco medial y habitualmente afectado en esta afección. Posteriormente se realizó la reparación de este mediante puntos simples con sutura de alta resistencia tipo FiberWire® (Arthrex, Naples, FL, EE. UU.) y aumentación con FiberTape® (Arthrex, Naples, FL, EE. UU.). Introducimos una aguja de Kirschner 1,35 mm a nivel del sustentaculum tali con una angulación plantar de 15° y ligeramente posterior para evitar violar la articulación subtalar. Se realizó brocado con broca de 2,7 mm y posteriormente un implante SwiveLock® de 3,5 mm (Arthrex, Naples, FL, EE. UU.) cargado con el FiberTape®. A continuación, hicimos un túnel completo en el tubérculo del navicular introduciendo el FiberTape® de plantar a dorsal y de dorsal a plantar fijándolo con un tornillo de biotenodesis de 5,5 mm (fig. 1).

Para la segunda técnica añadimos la transferencia del FCD el cual se seccionó lo más cercano posible al nudo maestro de Henry. Se realizó la preparación del FCD con una sutura de alta resistencia tipo FiberLoop® (Arthrex, Naples, FL, EE. UU.) y se introdujo el tendón en el túnel del tubérculo del navicular previamente hecho, de plantar a dorsal (fig. 2).

Descripción del instrumento de medida

Con respecto al sistema de medición, se empleó un artrómetro diseñado por el Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Superior Técnico de Lisboa, para determinar la estabilidad angular de

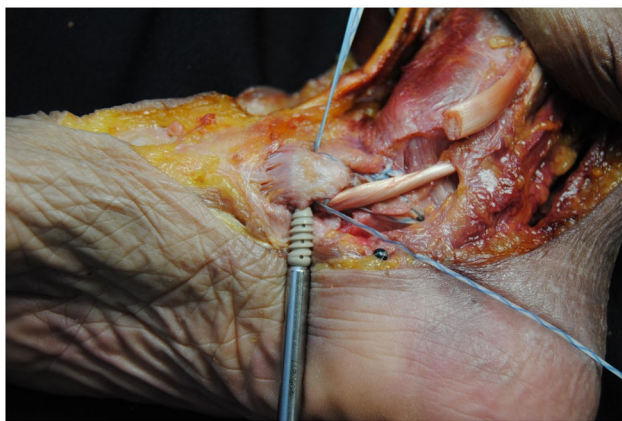


Figura 2. Transferencia del FDC previamente preparado con una sutura de alta resistencia tipo FiberLoop® (Arthrex, Naples, FL, EE. UU.). Se observa la introducción del tendón en el túnel del tubérculo del navicular de caudal a craneal fijado con un tornillo de biotenodésis.

la articulación talonavicular. Consta de un MPU-6050 GY-521, una unidad de medida inercial (IMU) de 6 grados de libertad con un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes, para medir ángulos en tiempo real. Los cuales fueron procesados mediante un algoritmo y un software especializado para la fusión de los datos.

El sensor IMU estaba controlado por una placa Arduino Mega 2560, que se utilizó como microcontrolador. La calibración del sistema aseguró que los giroscopios midieran los ángulos de rotación entre la posición inicial y la posición final después de cada paso del protocolo de prueba.

Análisis estadístico

Dado el pequeño tamaño de la muestra del estudio, no se pudo suponer que los datos tuvieran una distribución normal, por lo que se utilizó la prueba de Wilcoxon como análisis no paramétrico. El análisis estadístico fue realizado con el software R versión 4.3.1. Comparando la estabilidad del ligamento de calcaneonavicular sano frente al lesionado y tras las 2 técnicas de reconstrucción. Considerando como estadísticamente significativo un p valor $\leq 0,05$.

Resultados

En primer lugar, se realizó un análisis de datos descriptivo en el cual se recogieron las medias con sus desviaciones estándar y las medianas con sus rangos intercuartílicos, de cada movimiento, en cada uno de los 3 planos tras las maniobras exploratorias (abducción y rotación externa, pronación y eversion, colapso y flexión plantar, carga axial) en los distintos estados ya descritos (integridad, sección del ligamento, reparación y aumentación y transferencia del FCD). Todo ello recogido en la tabla 1.

En las figuras 3 a 6 se muestra la evolución de la media para cada uno de los estados estudiados tras cada movimiento explorado. Se puede observar cómo partimos de un valor de referencia con el ligamento íntegro y tras la sección del mismo se genera una inestabilidad con aumentos francos de la movilidad en todos los movimientos. El análisis comparativo de comportamiento biomecánico del estado de referencia con el de inestabilidad, obtuvo diferencias estadísticamente significativas en las maniobras de abducción y rotación externa en el plano coronal y sagital ($p = 0,050$ y $p = 0,045$, respectivamente) (tabla 2).

Tras la reparación y aumentación, se observa una mejoría en estos valores. Posteriormente, con la transferencia del FCD, dicha mejoría se intensifica, alcanzándose en todos los puntos una estabilidad superior a la del pie de referencia. Comparando el estado de referencia con reparación y aumentación observamos que existen diferencias estadísticamente significativas para la maniobra de abducción y rotación externa

en el plano horizontal ($p = 0,047$) (tabla 3). El resultado fue también significativo al comparar los valores de la referencia con la transferencia del FCD ($p = 0,002$) (tabla 4).

Comparando la técnica de reparación y aumentación con el de transferencia no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas (tabla 6).

Discusión

Tras la realización del estudio y análisis exhaustivo de los datos fue posible comprobar la importancia del ligamento calcaneonavicular en la estabilización del mediopié, sobre todo en los planos coronal y sagital. Estudios previos en cadáver confirmaban el papel primordial del mismo en la restricción estática de la subluxación peritalar de la cabeza del astrágalo, impidiendo el desplazamiento de la carga del retropié a la columna lateral^{12,15}. Los trabajos de Jennings MM et al. y Hintermann B et al., también demostraron la importancia del ligamento calcaneonavicular en el mantenimiento de la alineación sagital del retropié y en la reducción de la pronación en esta región. En nuestro estudio también se demostró una tendencia hacia la inestabilidad en estos parámetros tras la sección del ligamento, si bien no alcanzaron significación estadística^{16,17}.

Actualmente, muchos investigadores abogan por el uso de la reconstrucción del ligamento calcaneonavicular en el contexto de una deformidad grave del pie plano para evitar técnicas más agresivas como las artrodesis⁵. Múltiples técnicas de reparación con aloinjertos y autoinjertos han sido implementadas con este fin, desde la transferencia del peroneo largo, tibial anterior, flexor largo del dedo gordo, hasta el uso de injertos con bloque óseo de ligamento deltoideo^{5,18-21}. Todas estas técnicas asociaban gran morbilidad y pérdida de fuerza, por lo que surgieron nuevos sistemas de aumentación como alternativa.

Los sistemas de reparación fueron descritos como una alternativa segura y eficaz, demostrándose una resistencia mejorada en comparación con la reparación estándar del ligamento. Estudios biomecánicos en cadáver como el de Acevedo y Vora, desarrollaron técnicas de reparación similares a la descrita en nuestro estudio, con los que obtuvieron buenos resultados, valorando el utilizar estas técnicas asociadas a la transferencia del FCD y las osteotomías medializadoras como gestos asociados²²⁻²⁴.

Palmanovich et al., llegaron a reportar con la utilización del FiberTape® (Arthrex, Naples, FL, EE. UU.) mejoras en la puntuación de la AOFAS de 55,8 antes de la cirugía a 97,6 un año después de la misma²⁵. Varios autores establecieron que las reparaciones aisladas del ligamento, así como las transferencias solían fracasar de manera aislada, por lo que las combinaciones de varias técnicas reparadoras eran una opción atractiva para la estabilización quirúrgica^{5,26,27}. Así surgió la idea de añadir a la aumentación la transferencia clásica del FCD.

Los resultados en los especímenes de nuestro estudio concluyeron que ambas técnicas recreaban las restricciones anatómicas normales del ligamento. Cabe destacar que ambas técnicas mostraron unos resultados francamente similares, lo que sugiere que podrían ser igualmente eficaces para alcanzar un grado de estabilización similar al de un ligamento íntegro.

Aunque aún se requieren estudios más amplios con seguimiento a largo plazo, la reconstrucción del ligamento calcaneonavicular ha sido ampliamente investigada como un procedimiento potencialmente eficaz para la realineación de la articulación talonavicular²⁸⁻³⁰. La evaluación de la eficacia de las técnicas de reparación sigue siendo un reto, debido a la diversidad de enfoques quirúrgicos y a la frecuente realización de procedimientos concomitantes en la reconstrucción del pie plano. No obstante, los hallazgos de nuestro estudio sugieren que la reparación podría restablecer de forma significativa las características biomecánicas del arco del mediopié. Si bien aún no existe evidencia concluyente que demuestre la superioridad de una técnica sobre otra, estos resultados se alinean con estudios previos y refuerzan el camino hacia estrate-

Tabla 1

La tabla muestra el análisis descriptivo del desplazamiento angular de la articulación talonavicular, obtenido mediante distintas maniobras de exploración en los 3 planos espaciales

	Referencia	Inestabilidad	Reparación y aumentación	Transferencia del FCD	Sección lig deltoideo sup	Sección lig deltoideo prof
Abducción y rotación externa-coronal	-6,60	-10,50	-9,50	-8,90	-10,30	-10,90
Abducción y rotación externa-horizontal	9,30	10,00	6,70	4,90	5,10	6,70
Abducción y rotación externa-sagital	-12,30	-16,00	-12,40	-13,10	-14,20	-15,50
Pronación y eversión-coronal	11,50	-11,90	-11,80	-10,90	-11,90	-12,00
Pronación y eversión-horizontal	5,40	6,80	6,10	5,20	5,40	7,30
Pronación y eversión-sagital	-10,40	-13,00	-10,50	-10,20	-11,90	-13,70
Colapso (flexión plantar)-coronal	-2,30	-0,40	-1,60	-2,00	-1,30	-2,10
Colapso (flexión plantar)-horizontal	0,30	-0,20	1,60	0,60	-0,40	-0,10
Colapso (flexión plantar)-sagital	9,70	10,00	8,70	8,70	10,40	11,70
Carga axial-coronal	-4,10	-3,30	-3,20	-3,80	-3,40	-2,30
Carga axial-horizontal	0,40	0,80	0,60	-1,60	-2,20	-2,00
Carga axial-sagital	-18,50	-21,20	-18,00	-19,10	-20,70	-21,00

Para la recopilación de los datos, se utilizó como método analítico el cálculo de la media y la desviación estándar.

FCD: flexor común de los dedos.

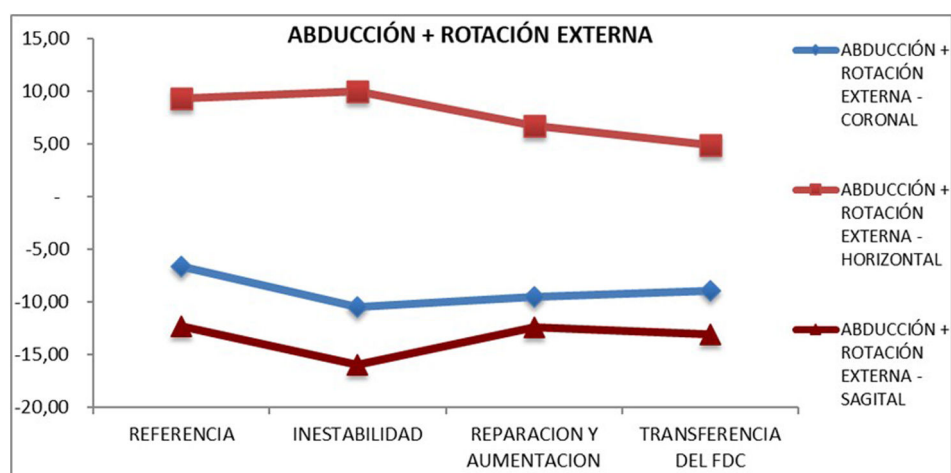


Figura 3. Gráfica que muestra el comportamiento de la media para la maniobra de abducción + rotación externa en los 3 planos del espacio.

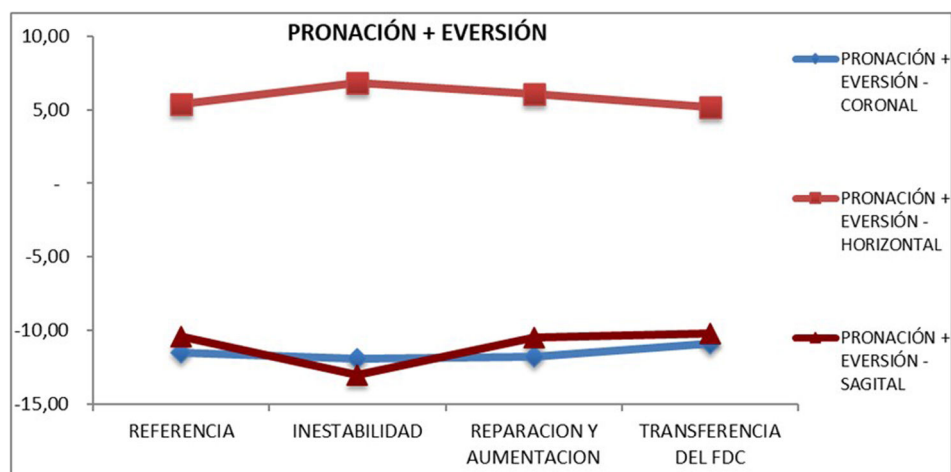


Figura 4. Gráfica que muestra el comportamiento de la media para la maniobra de pronación + eversión en los 3 planos del espacio.

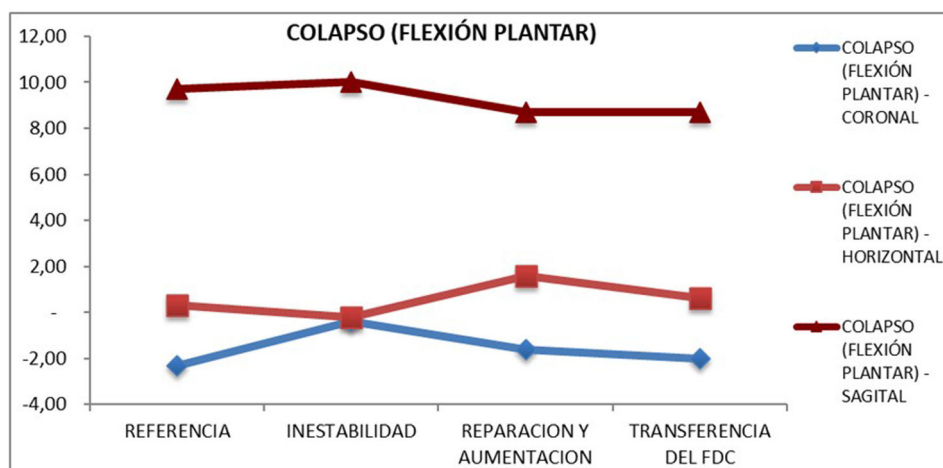


Figura 5. Gráfica que muestra el comportamiento de la media para la maniobra de colapso (flexión plantar) en los 3 planos del espacio.

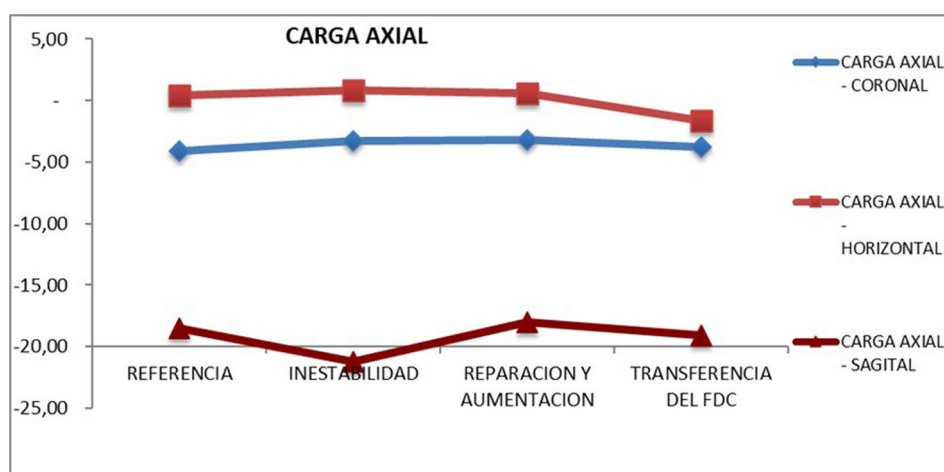


Figura 6. Gráfica que muestra el comportamiento de la media para la maniobra de carga axial en los 3 planos del espacio.

Tabla 2

Tabla en la que se muestra el análisis comparativo del ligamento calcaneonavicular

Análisis comparativo referencia frente a inestabilidad		
Eje	Comparación	Valor de p
Horizontal	Abducción y rotación externa	0,529
	Pronación y eversion	0,312
	Colapso (flexión plantar)	0,741
	Carga axial	0,992
Coronal	Abducción y rotación externa	0,050
	Pronación y eversion	0,944
	Colapso (flexión plantar)	0,303
	Carga axial	0,543
sagital	Abducción y rotación externa	0,045
	Pronación y eversion	0,194
	Colapso (flexión plantar)	0,834
	Carga axial	0,089

Tabla 3

Tabla en la que se muestra el análisis comparativo del ligamento calcaneonavicular

Análisis comparativo referencia frente a reparación y aumentación		
Eje	Comparación	Valor de p
Horizontal	Abducción y rotación externa	0,047
	Pronación y eversion	0,628
	Colapso (flexión plantar)	0,304
	Carga axial	0,881
Coronal	Abducción y rotación externa	0,313
	Pronación y eversion	0,846
	Colapso (flexión plantar)	0,954
	Carga axial	0,342
Sagital	Abducción y rotación externa	0,954
	Pronación y eversion	0,823
	Colapso (flexión plantar)	0,388
	Carga axial	0,779

gias quirúrgicas más personalizadas y eficaces. Los futuros trabajos de investigación se deben basar en un buen diseño metodológico, una evidencia biomecánica sólida, con el fin de optimizar las intervenciones quirúrgicas en el tratamiento del pie plano.

Limitaciones y fortalezas

Dado que este estudio se llevó a cabo en especímenes cadavéricos, es importante reconocer las limitaciones inherentes a este modelo

Tabla 4

Tabla en la que se muestra el análisis comparativo del ligamento calcaneonavicular

Análisis comparativo referencia frente a transferencia FCD		
Eje	Comparación	Valor de p
Horizontal	Abducción y rotación externa	0,002
	Pronación y eversión	0,960
	Colapso (flexión plantar)	0,904
	Carga axial	0,190
Coronal	Abducción y rotación externa	0,562
	Pronación y eversión	0,617
	Colapso (flexión plantar)	0,904
	Carga axial	0,845
Sagital	Abducción y rotación externa	0,719
	Pronación y eversión	0,697
	Colapso (flexión plantar)	0,441
	Carga axial	0,893

FCD: flexor común de los dedos.

Tabla 6

Tabla en la que se muestra el análisis comparativo del ligamento calcaneonavicular

Análisis comparativo reparación y augmentación frente a transferencia FCD		
Eje	Comparación	Valor de p
Horizontal	Abducción y rotación externa	0,142
	Pronación y eversión	0,667
	Colapso (flexión plantar)	0,435
	Carga axial	0,110
Coronal	Abducción y rotación externa	0,726
	Pronación y eversión	0,441
	Colapso (flexión plantar)	0,944
	Carga axial	0,529
Sagital	Abducción y rotación externa	0,779
	Pronación y eversión	0,689
	Colapso (flexión plantar)	0,897
	Carga axial	0,865

FCD: flexor común de los dedos.

experimental, que restringen la generalización de los hallazgos a condiciones dinámicas propias de sujetos vivos. Aunque los tendones en los especímenes inertes pierden su función dinámica, su inclusión permite evaluar la contribución estructural y pasiva de las intervenciones en la reconstrucción ligamentaria. En la práctica clínica, diversas técnicas quirúrgicas emplean refuerzos pasivos para estabilizar la articulación, lo que justifica su uso en el modelo cadavérico. La falta de peso corporal en los especímenes limita la replicación exacta de las cargas fisiológicas, pero el modelo cadavérico permite estudiar de manera precisa la mecánica estructural de las intervenciones. Asimismo, cabe señalar que la sección del ligamento calcaneonavicular se realizó mediante identificación anatómica directa, sin confirmación histológica, lo cual puede introducir cierta variabilidad en la delimitación exacta de los fascículos afectados, aunque se procuró reproducir el patrón lesional más habitual observado en la práctica clínica.

Es una ventaja que las propiedades biomecánicas y anatómicas del modelo fresco congelado del estudio se asemejan a las de un tobillo en un sujeto vivo. De la misma forma, que las maniobras de exploración practicadas sobre una pieza cadavérica reproducen de manera fiel las realizadas en una consulta clínica. Esto nos permite realizar un estudio de la anatomía real del ligamento, incluyendo su relación con estructuras cercanas y la relación biomecánica con las mismas. Este análisis tridimensional, cuya reproducibilidad resulta limitada mediante otros

métodos, constituye un punto de partida sólido para su comparación con estudios sustentados en parámetros histológicos y pruebas de imagen.

Este estudio en cadáver testa la estabilidad intrínseca de ambas reparaciones y no tiene en cuenta los procesos de reparación y fibrosis que, con el tiempo, acontecen en el tobillo de un paciente tratado con dicha técnica

Conclusiones

La sección del ligamento calcaneonavicular generó inestabilidad en el plano coronal y sagital en los movimientos de abducción y rotación externa. Las técnicas quirúrgicas de reparación con aumentación y con transferencia del FCD restauraron la estabilidad articular, mostrando una solidez incluso superior a la del ligamento intacto. Los análisis estadísticos mostraron una mejora significativa en la estabilidad del arco plantar medial con ambas técnicas (abducción y rotación externa: reparación, $p = 0,047$; transferencia de FCD; $p = 0,002$), sin diferencias significativas entre ellas. Este estudio refuerza la importancia del ligamento de calcaneonavicular en la biomecánica del mediopié y valida la eficacia de estas técnicas quirúrgicas en su reconstrucción.

Nivel de evidencia

Nivel de evidencia III.

Financiación

El presente estudio ha podido realizarse gracias al apoyo financiero recibido a través de la convocatoria ‘Proyectos de Inicio a la Investigación de la Fundación SECOT’ correspondiente al año 2022.

Consideraciones éticas

La presente investigación ha sido evaluada por el comité de Bioética del Hospital Universitario de Móstoles, obteniendo su aprobación el 28 de marzo de 2023. No se identifican aspectos éticos relevantes en este manuscrito.

Conflicto de intereses

El autor J. Vilá y Rico es consultor internacional de Arthrex.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento al personal del Departamento de Anatomía y Embriología de la Universidad Complutense de Madrid, así como al equipo técnico de la sala de disección, por su colaboración en la realización de este trabajo. Agradecemos también a Arthrex España por la generosa cesión de los materiales necesarios para la ejecución de este estudio.

Bibliografía

- Bernasconi A, Vacas E, Godoy-Santos AL, Lintz F. Progressive collapsing foot deformity: How should we translate it into Neo-Latin languages? *Foot Ankle Surg.* 2021;27:949–950.
- De Cesar Netto C, Deland JT, Ellis SJ. Guest Editorial: Expert Consensus on Adult-Acquired Flatfoot Deformity. *Foot Ankle Int.* 2020;41:1269–1271.
- Myerson MS, Thordarson DB, Johnson JE, et al. Classification and Nomenclature: Progressive Collapsing Foot Deformity. *Foot Ankle Int.* 2020;41:1271–1276.
- Dressler HB, Carvalho KAMde, Zambelli R, Mansur NSB, Cesar Netto Cde. Acquired Pes Planovalgus: Current Concepts - ‘From Adult Acquired Pes Planovalgus to Progressive Collapsing Foot Deformity’. *Rev Bras Ortop.* 2024;59:e809–e814.
- Bastias GF, Dalmau-Pastor M, Astudillo C, Pellegrini MJ. Spring Ligament Instability. *Foot Ankle Clin.* 2018;23:659–678.
- Huang CK, Kitaoka HB, An KN, Chao EYS. Biomechanical Evaluation of Longitudinal Arch Stability. *Foot Ankle.* 1993;14:353–357.
- Malakoutikhah H, Madenci E, Latt LD. The contribution of the ligaments in progressive collapsing foot deformity: A comprehensive computational study. *J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc.* 2022;40:2209–2221.

8. Steginsky B, Vora A. What to Do with the Spring Ligament. *Foot Ankle Clin.* 2017;22:515–527.
9. Yanguma-Muñoz N, Bayod J, Cifuentes-De la Portilla C. A single computational model to simulate the three foot-rocker mechanisms of the gait cycle. *Sci Rep.* 2024;14:29051.
10. Cain JD, Dalmau-Pastor M. Anatomy of the Deltoid-Spring Ligament Complex. *Foot Ankle Clin.* 2021;26:237–247.
11. Reeck J, Felten N, McCormack AP, Kiser P, Tencer AF, Sangeorzan BJ. Support of the talus: A biomechanical investigation of the contributions of the talonavicular and talocalcaneal joints, and the superomedial calcaneonavicular ligament. *Foot Ankle Int.* 1998;19:674–682.
12. Renfree S, Malakoutikhah H, Borgstrom M, Latt LD. An ex vivo sequential ligament transection model of flatfoot. *Clin Biomech Bristol Avon.* 2024;118:106302.
13. Zanolli DH, Glisson RR, Nunley JA, Easley ME. Biomechanical Assessment of Flexible Flatfoot Correction: Comparison of Techniques in a Cadaver Model. *J Bone Jt Surg.* 2014;96:e45.
14. García-Jarabo E, Ramos-Ramos LM, Sánchez-Morata EJ, Hernanz-González Y, Mellado-Romero MÁ, Rico JYV. Surgical treatment at adult acquired flatfoot stage IIB: Spring ligament repair [Article in English, Spanish]. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol.* 2023;67:62–67.
15. Cavanagh PR, Rodgers MM, Iiboshi A. Pressure distribution under symptom-free feet during barefoot standing. *Foot Ankle.* 1987;7:262–276.
16. Jennings MM, Christensen JC. The effects of sectioning the spring ligament on rear-foot stability and posterior tibial tendon efficiency. *J Foot Ankle Surg Off Publ Am Coll Foot Ankle Surg.* 2008;47:219–224.
17. Hintermann B, Ruiz R. Biomechanics of Medial Ankle and Peritalar Instability. *Foot Ankle Clin.* 2021;26:249–267.
18. Deland JT, Arnoczky SP, Thompson FM. Adult Acquired Flatfoot Deformity at the Talonavicular Joint: Reconstruction of the Spring Ligament in an in Vitro Model. 1992;13:327–332 [accessed 13 Apr 2025] Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/107110079201300606>.
19. Thordarson DB, Schmotzer H, Chon J. Reconstruction with tenodesis in an adult flatfoot model. A biomechanical evaluation of four methods. *JBJS.* 1995; 77:1557.
20. Choi K, Lee S, Otis JC, Deland JT. Anatomical Reconstruction of the Spring Ligament Using Peroneus Longus Tendon Graft. *Foot Ankle Int.* 2003;24:430–436 [accessed 13 Apr 2025] Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/107110070302400510>.
21. Lee WC, Yi Y. Spring Ligament Reconstruction Using the Autogenous Flexor Hallucis Longus Tendon. *Orthopedics.* 2014;37:467–471.
22. Aynardi M, Saloky K, Juliano P, Lewis G. Pilot Biomechanical Evaluation of Spring Ligament Augmentation with the Internal Brace in a Cadaveric Flatfoot Model. *Foot Ankle Orthop.* 2018;3, 2473011418S00147.
23. Acevedo J, Vora A. Anatomical Reconstruction of the Spring Ligament Complex. 2013 [accessed 13 Apr 2025] Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1938640013499404>.
24. Anatomic Reconstruction Technique for a Plantar Calcaneonavicular (Spring) Ligament Tear - ClinicalKey [accessed 13 Apr 2025] Available from: <https://www.clinicalkey-es.m-hmos.a17.csinet.es/#!/content/playContent/1-s2.0-S1067251615002884?returnurl=null&referrer=null>.
25. Novel reconstruction technique for an isolated plantar calcaneonavicular (SPRING) ligament tear - ClinicalKey [accessed 13 Apr 2025] Available from: <https://www.clinicalkey-es.m-hmos.a17.csinet.es/#!/content/playContent/1-s2.0-S0958259216300979?returnurl=null&referrer=null>.
26. Deland JT. Spring ligament complex and flatfoot deformity: curse or blessing? *Foot Ankle Int.* 2012;33:239–243.
27. Baxter JR, LaMothe JM, Walls RJ, Prado MP, Gilbert SL, Deland JT. Reconstruction of the Medial Talonavicular Joint in Simulated Flatfoot Deformity. *Foot Ankle Int.* 2015;36:424–429 [accessed 14 Apr 2025] Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1071100714558512>.
28. Chien BY, Greisberg JK, Arciero E. Spring Ligament Reconstruction for Progressive Collapsing Foot Deformity: Contemporary Review. *Foot Ankle Int.* 2023;44:796–809.
29. Lee W, Teclé N, Knapp E, Awad H, Oh I. Biomechanical Effects of Subtalar Joint Fusion and Medial Ligament Reconstruction in Simulated Progressive Collapsing Foot Deformity. *Foot Ankle Int.* 2024;45:279–290.
30. Fadle AA, Khalifa AA, Bahy A, et al. Joint preservation surgery for correcting adolescents' spasmodic flatfoot deformity: Early results from a specialized North African foot and ankle unit. *Int Orthop.* 2024;48:1543–1552.