

ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA DE ZARAGOZA



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza



PROYECTO DE FIN DE CARRERA

ESTUDIO DEL ESPOLÓN EN EL
CALCÁNEO Y DE LA EXTRACCIÓN
DE LOS HUESOS SESAMOIDEOS

AUTOR: Santiago Ontaneda Cortez.

DIRIGIDO POR: Javier Bayod López.

SEPTIEMBRE DEL 2014

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	5
1.1.	EL I3A Y GEMM.....	5
1.2.	OBJETIVO	7
2.	ANATOMÍA DEL PIE	9
2.1.	HUESOS QUE COMPONEN EL PIE.....	9
2.1.1.	HUESOS DEL TARSO	10
2.1.1.1.	ASTRÁGALO	10
2.1.1.2.	CALCÁNEO.....	12
2.1.1.3.	CUBOIDES.....	14
2.1.1.4.	ESCAFOIDES O NAVICULAR.....	14
2.1.1.5.	CUNEIFORMES O CUÑAS	15
2.1.2.	HUESOS DEL METATARSO	17
2.1.2.1.	PRIMER METATARSIANO	18
2.1.2.2.	SEGUNDO METATARSIANO.....	18
2.1.2.3.	TERCER METATARSIANO.....	18
2.1.2.4.	CUARTO METATARSIANO	19
2.1.2.5.	QUINTO METATARSIANO.....	19
2.1.3.	LAS FALANGES	19
2.2.	ARTICULACIONES DEL PIE.....	20
2.2.1.	ARTICULACIÓN SUBASTRAGALINA.	22
2.2.2.	ARTICULACIÓN ASTRAGALOCALCANEONAVICULAR	23
2.2.3.	ARTICULACIÓN CALCANEOCUBOIDEA	25
2.2.4.	ARTICULACIONES TARSOMETATARSIANAS.....	26
2.2.5.	ARTICULACIONES METATARSOFALÁNGICAS.....	27
2.3.	ARCOS DEL PIE.....	28
2.4.	FASCIA PROFUNDA DEL PIE	29
3.	BIOMECÁNICA DEL PIE.....	31

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

3.1.	EJES DE ARTICULACIÓN	31
3.2.	ACCIÓN DE LOS MUSCULOS DEL PIE	33
3.3.	ABSORCIÓN DEL IMPACTO	34
4.	CICLO DE LA MARCHA.....	35
5.	PATOLOGÍAS.....	38
5.1.	METATARSALGIA	38
5.2.	FASCITIS PLANTAR	39
5.3.	HALLUX VALGUS	40
5.4.	DEDOS EN GARRA O MARTILLO.....	41
5.5.	ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO	42
6.	TRABAJO REALIZADO	45
6.1.	PROGRAMAS INFORMÁTICOS	45
6.1.1.	I-DEAS.....	45
6.1.2.	ABAQUS	45
6.2.	CASOS A ESTUDIAR	46
6.2.1.	ESPOLÓN CALCÁNEO	46
6.2.1.1.	CIRUGÍA.....	46
6.2.1.2.	I-DEAS.....	46
6.2.1.3.	ABAQUS	47
6.2.2.	SESAMOIDEOS.....	48
6.2.2.1.	CIRUGÍA.....	48
6.2.2.2.	I-DEAS.....	49
6.2.2.3.	ABAQUS	49
6.2.3.	PROPIEDADES DE LOS TEJIDOS.....	49
6.2.3.1.	HUESOS	50
6.2.3.2.	LIGAMENTOS.....	51
6.2.3.3.	CARTILAGOS	54
6.2.4.	CONDICIONES DE CONTORNO.....	54
6.2.5.	CARGAS APLICADAS.....	55

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

7.	ANALISIS DE RESULTADOS	57
7.1.	RESULTADOS DEL CASO DEL ESPOLÓN.....	57
7.1.1.	TENSIONES MÁXIMAS.....	57
7.1.2.	TENSIONES MÍNIMAS	59
7.1.3.	DESPLAZAMIENTOS	61
7.1.4.	RESUMEN.....	63
7.2.	RESULTADOS DEL CASO DE LOS SESAMOIDEOS	65
7.2.1.	EXTRACCIÓN DEL SESAMOIDEO MEDIAL.....	65
7.2.1.1.	TENSIONES MÁXIMAS	65
7.2.1.2.	TENSIONES MÍNIMAS	68
7.2.2.	EXTRACCIÓN DEL SESAMOIDEO LATERAL.....	71
7.2.2.1.	TENSIONES MÁXIMAS	71
7.2.2.2.	TENSIONES MÍNIMAS	74
7.2.3.	EXTRACCIÓN DE LOS DOS SESAMOIDEOS.....	77
7.2.3.1.	TENSIONES MÁXIMAS	77
7.2.3.2.	TENSIONES MÍNIMAS.....	80
7.2.4.	DESPLAZAMIENTOS	83
7.2.4.1.	DESPLAZAMIENTOS EN X.....	83
7.2.4.2.	DESPLAZAMIENTOS EN Y.....	84
7.2.4.3.	DESPLAZAMIENTOS EN Z	86
7.2.5.	RESUMEN.....	87
8.	CONCLUSIONES	89
8.1.	CALCÁNEO	89
8.2.	SESAMOIDEOS	89
9.	RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO	91
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	92

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EL I3A Y GEMM.

El Instituto de investigación de Ingeniería de Aragón (I3A), fue creado por el Gobierno de Aragón el 14 de Mayo de 2002, con la finalidad de fomentar la investigación básica y orientada de calidad, así como el desarrollo económico regional y nacional mediante una colaboración sostenida con el tejido empresarial. Su funcionamiento se basa en la cooperación inter-departamental y multidisciplinar, cuyos integrantes son miembros de las facultades de Ciencias, Ciencias Económicas y Empresariales, Ingeniería, Medicina y Ciencias Veterinarias.

El I3A cuenta con aproximadamente 500 investigadores que conforman 32 grupos de investigación autónomos y con una especialización temática cuyo objetivo es la búsqueda de la excelencia en su campo y la transferencia tecnológica. Estos grupos son los encargados de hacer frente a cuatro grandes divisiones de I+D:

- Ingeniería Biomédica
- Tecnologías de la Información y Comunicaciones
- Procesos y Reciclado
- Tecnologías Industriales

El grupo GEMM (Grupo de Mecánica Estructural y Modelado de Materiales) es uno de los 32 componentes del I3A que forma parte de la división de Ingeniería Biomédica. Esta división es una muestra de la variedad multidisciplinar que aúna distintos campos como son el de Física, Matemáticas, Biología, Medicina e Ingeniería, campos muy distintos entre sí pero que se asocian con un mismo objetivo, buscar soluciones tecnológicas para mejorar la salud y la calidad de vida.

Los grupos que conforman esta división se encargan de llevar a cabo cuatro líneas de investigación:

- Ingeniería de tejidos y biomateriales
- Modelado biológico y biomecánica
- Tratamiento de señales e imagen médica. Instrumentación médica

- Tecnologías preventivas y existenciales

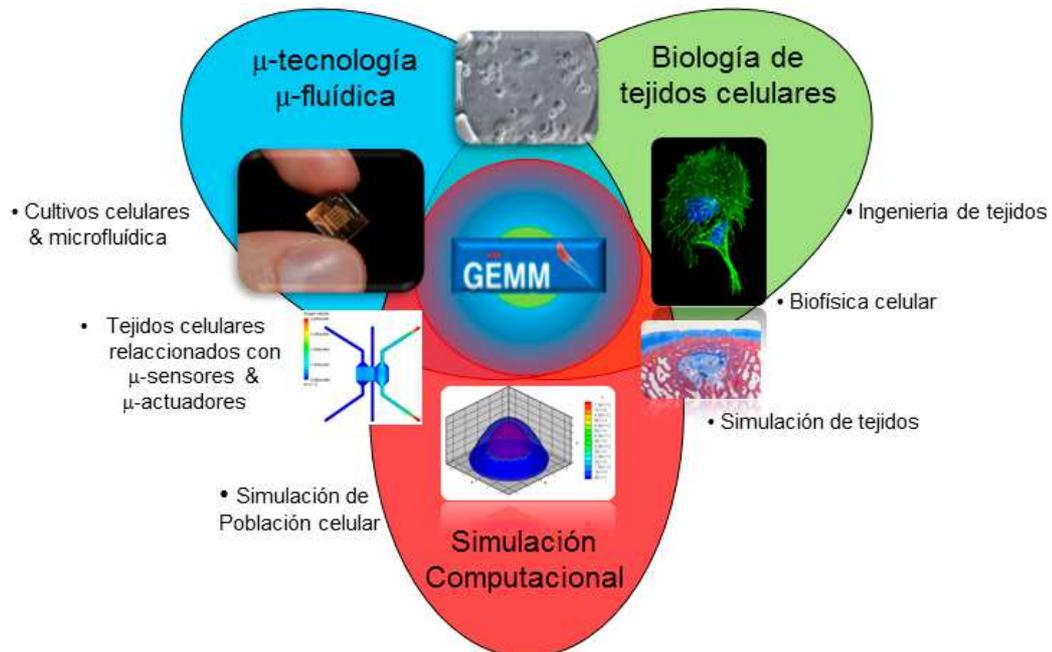


Figura 1: Líneas de investigación del GEMM.

Aparte de estas líneas de investigación comunes para los grupos de esta división, el grupo GEMM abarca otras tres líneas propias de su grupo:

- Biología de tejidos celulares
- μ -tecnología μ -fluídica
- Simulación computacional

Este proyecto se centra en la línea de simulación computacional, concretamente en la simulación mediante elementos finitos.

La ingeniería biomédica se ocupa de la investigación de los distintos mecanismos moleculares, bioquímicos y genéticos de las enfermedades cuyo objetivo es el desarrollo de fármacos, prótesis o nuevas técnicas para tratar las distintas enfermedades que pueda sufrir el ser humano. Uno de los campos que abarca la ciencia biomédica es la biomecánica, un área multidisciplinaria que se sirve de los conocimientos de mecánica, anatomía, biología, ingeniería, etc. Una de las herramientas con las que se lleva a cabo los estudios de biomecánica, es la biomecánica computacional que ha

tenido un gran avance en los últimos tiempos debido a la mejora continua de los ordenadores convirtiéndose hoy en día en una potente herramienta.

Esta herramienta permite la simulación por ordenador de sistemas biomecánicos complejos que facilitan la comprensión del funcionamiento de estructuras y órganos biológicos. De esta manera se realiza un estudio que resulta más económico y rápido que un estudio experimental que podría resultar más caro y complejo.

En este proyecto de fin de carrera se ha realizado un análisis a partir de un modelo del creado previamente para otras investigaciones.

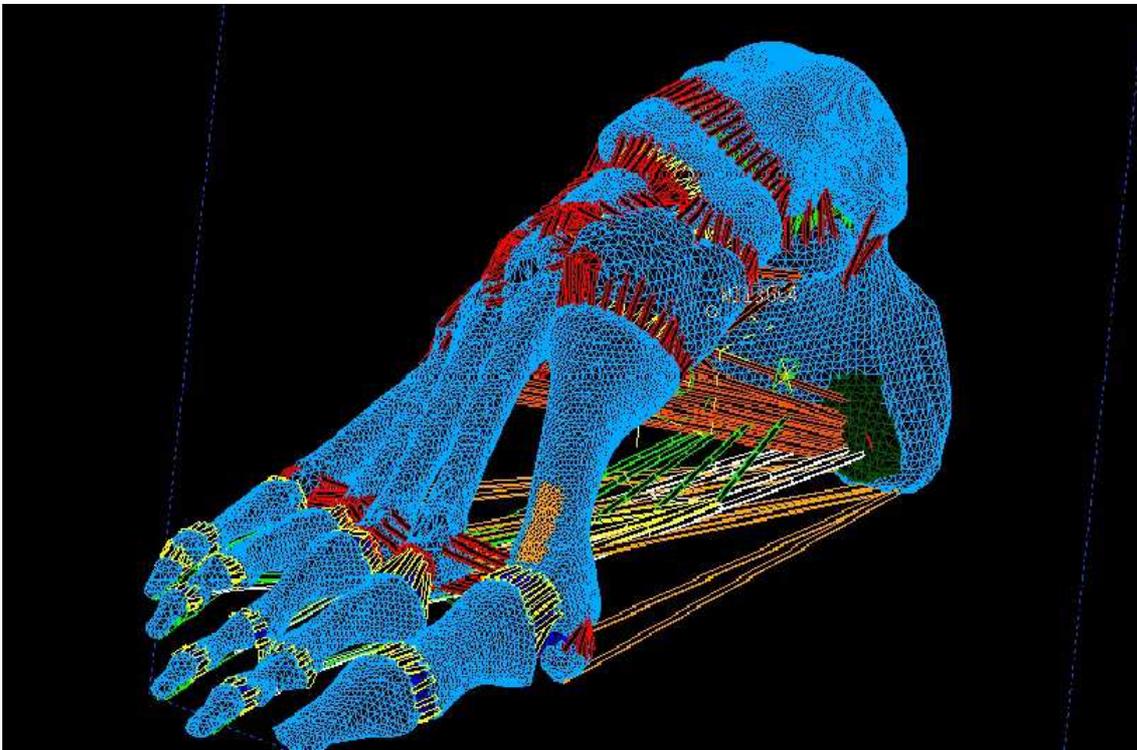


Figura 2: Malla de la estructura del pie.

1.2.OBJETIVO

Con los resultados obtenidos, realizaremos un análisis de las tensiones, tanto de tracción como de compresión, y su nueva distribución en el hueso. En el caso del espolón en el calcáneo, los cambios producidos se deben a la variación de estructura del calcáneo durante la extirpación del espolón. Y en el caso de los sesamoideos, se deben a la ausencia de uno o los dos sesamoideos.

El objetivo de este proyecto es realizar un análisis biomecánico de los efectos que se producen en el pie humano tras realizarse dos operaciones quirúrgicas para aliviar sendas patologías del mencionado órgano.

Llevaremos a cabo una comparación del mapa de tensiones, las tensiones máximas y los desplazamientos de un caso referencia, que se corresponde con un pie sano, con los casos del espolón y la extracción de los sesamoideos. Estos datos permitirán conocer cómo se puede comportar el pie después de haber sido tratado y plantearse cuales pueden ser los posibles efectos secundarios, en el caso del espolón, por ejemplo, hay un porcentaje pequeño de pacientes a los que se les suele producir fractura de calcáneo como efecto secundario de la operación.

Para llevar a cabo el estudio nos valdremos programas informáticos específicos para el cálculo computacional como son I-DEAS que nos permite modificar el modelo de malla del pie, así como crear grupos que nos facilitará el trabajo, y ABAQUS que nos mostrará los resultados obtenidos en cada uno de los casos.

2. ANATOMÍA DEL PIE

Para comprender de una manera mejor el funcionamiento y la estructura compleja del pie, vamos a hacer una descripción de los huesos que lo conforman, de los arcos que estos forman, de las articulaciones que existen entre ellos y de las fascias del pie.

2.1.HUESOS QUE COMPONENTEN EL PIE

El pie consta de 26 huesos, que se dividen en tres grupos: tarso, metatarso y las falanges.

Los huesos del tarso lo componen siete huesos cortos que se articulan formando dos filas, proximal y distal. La primera fila lo conforman dos huesos el calcáneo y el astrágalo. En la segunda fila se encuentran cinco huesos, que son el escafoides o hueso navicular, el cuboides y los cinco cuneiforme, denominados así por su forma de cuña.

El metatarso está formado por cinco huesos largos que se articulan con el tarso y con el último grupo, las falanges, constituido por catorce huesos que se dividen en falanges proximal y distal.

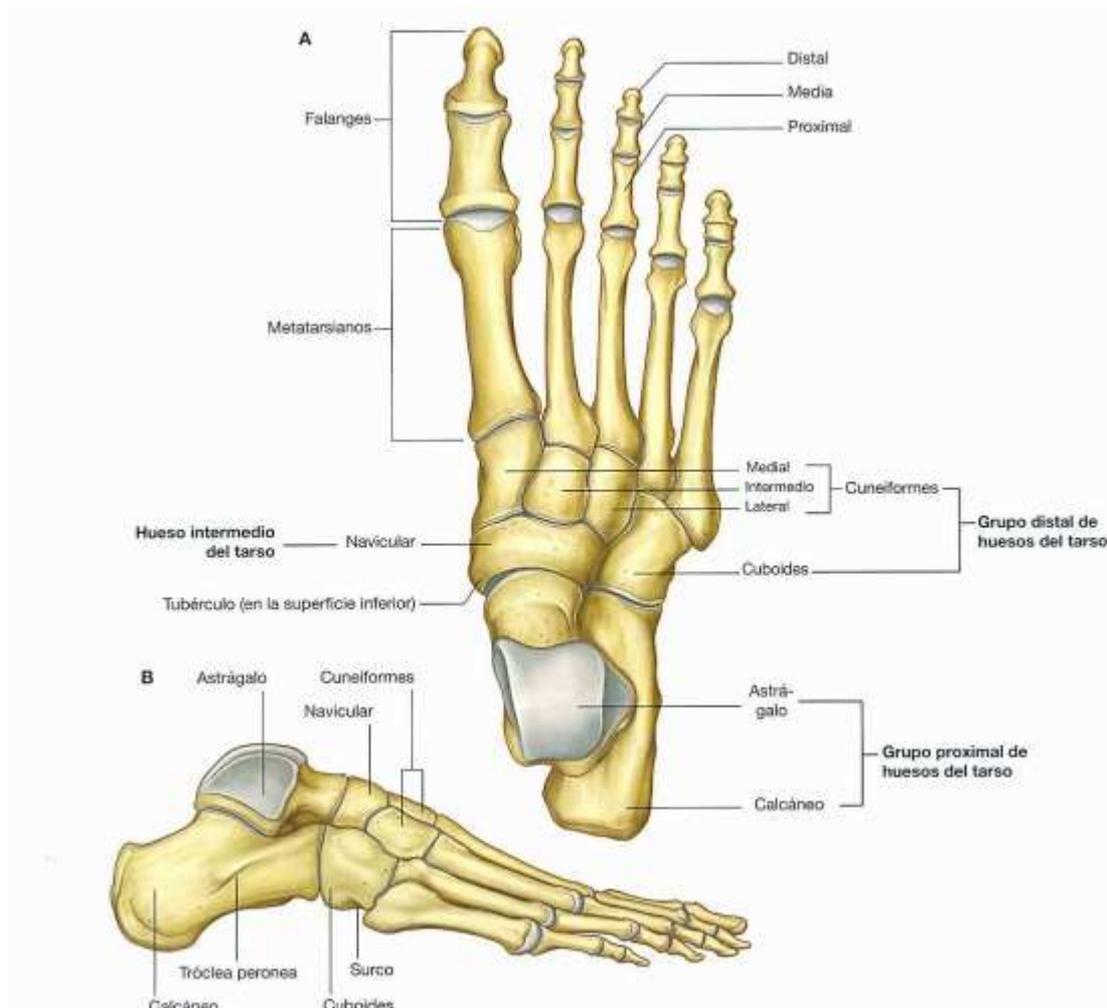


Figura 3: Huesos del pie.

2.1.1. HUESOS DEL TARSO

2.1.1.1. ASTRÁGALO

Es un hueso corto, aplanado y alargado de delante hacia atrás. En él podemos distinguir tres partes: cabeza, que es la zona donde se articula con el hueso navicular o escafoides, cuello, zona por donde circulan distintos vasos sanguíneos, y el cuerpo, donde se articula con la tibia y el peroné.

El astrágalo presenta seis caras:

La cara superior que posee una superficie articular en forma de polea denominada polea astragalina que conecta con la tibia. Tiene forma cóncava transversalmente y es convexa de delante a atrás. Su zona interna es más estrecha que la externa y se encuentra limitada por dos bordes semicirculares. El cuello se corresponde con la zona que se encuentra delante de la polea, que se encuentra inclinada hacia dentro y posee forma

de canal transversal. Que posee una cresta rugosa donde se fija la capsula tibio-tarsiana y el ligamento astrágalo-escafoideo superior.

La cara inferior posee dos superficies articulares, anterior y posterior, donde se articula con el calcáneo. Estas dos superficies se encuentran separadas por el surco astragalino que va de forma oblicua de delante hacia fuera. En este canal se inserta el ligamento astragalocalcaneo interóseo. La superficie anterior es convexa y forma parte de la superficie articular de la cabeza del astrágalo. La superficie posterior tiene forma cilíndrica.

La cara externa se articula con el maléolo externo mediante una cara lisa triangular cóncava de arriba abajo denominada carilla maleolar externa o carilla peronea. El vértice inferior se apoya sobre la apófisis externa del astrágalo.

La cara interna se articula con el maléolo tibial. Presenta por arriba y por detrás una cara prolongada en sentido anteroposterior y se continua por arriba con la polea astragalina. Por delante de esta se encuentra una zona rugosa que se corresponde con la cara interna del cuello y por debajo se extiende otra zona rugosa que va desde el cuello hasta la cara posterior del hueso, donde se inserta el fascículo profundo del ligamento interno de la garganta del pie.

La cara anterior comprende la cabeza del astrágalo y posee una forma convexa y alargada transversalmente. En la cabeza se pueden diferenciar tres partes: una región anterosuperior que se articula con el hueso escafoides, una región media situada detrás de este y finalmente una región posteroinferior formada por la cara anterointerna de la cara inferior del astrágalo.

La cara posterior es muy estrecha y se sitúa detrás de la polea astragalina. En esta cara se sitúa un canal oblicuo que se encuentra bordeado por el tubérculo externo y el interno. En el primero se halla insertado el fascículo peroneoastragaliano posterior del ligamento lateral externo.

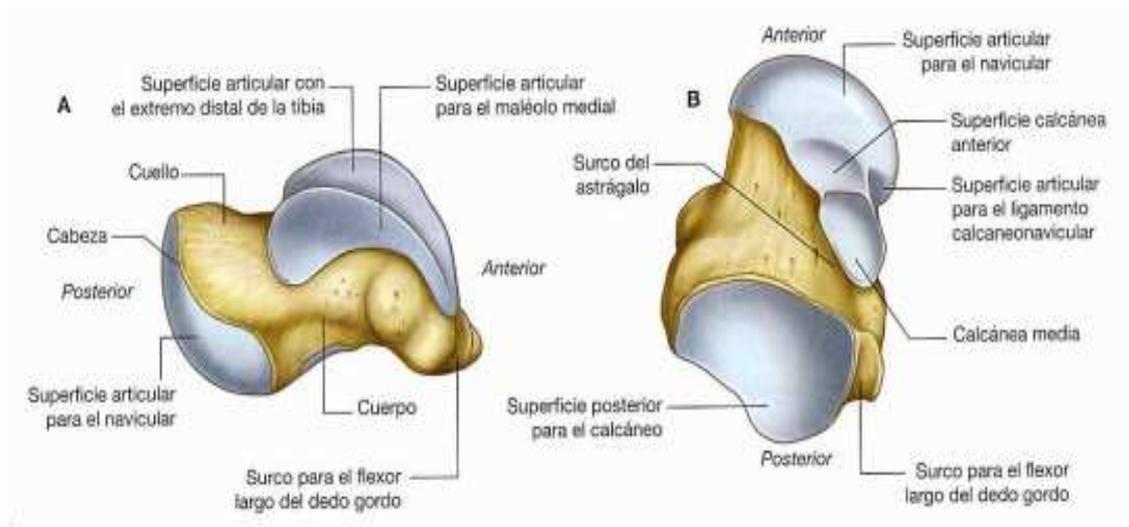


Figura 4: caras del astrágalo.

2.1.1.2. CALCÁNEO

Es el hueso más grande del tarso y se apoya en el suelo. Posee forma de cubo alargado y plano transversalmente, por lo tanto, vamos a reconocer en él, seis caras que se denominan igual que el astrágalo.

En la cara superior se encuentran diferenciadas dos regiones, posterior y anterior. La región anterior se articula el astrágalo, en la carilla anterointerna y la carilla posteroexterna. El canal formado entre estas dos caras se denomina surco calcáneo, que junto con el surco astragalino, contribuye a formar el canal del seno del tarso donde se inserta el ligamento interóseo de la articulación calcáneoastragalina. La región posterior posee una superficie rugosa, redondeada y cóncava de delante hacia atrás.

La cara inferior posee una forma irregular con numerosos agujeros vasculares. en su parte posterior se encuentran dos eminencias denominadas tuberosidades externa e interna, siendo esta ultima la más voluminosa y donde se insertan el musculo flexor corto plantar y el abductor del dedo pequeño del pie. La zona anterior es una superficie plana y rugosa donde se inserta el ligamento calcaneocuboideo inferior. Esta zona concluye en otra eminencia denominada tuberosidad anterior, en la cual se insertan los fascículos profundos del ligamento calcaneocuboideo inferior.

En la cara externa se observa, en la zona de unión del tercio anterior con los dos posteriores, el tubérculo externo del calcáneo. Por encima de

este, se halla un canal oblicuo de arriba hacia abajo donde se encuentran alojados, en la parte superior, el tendón peroneo lateral corto, y, por debajo de este, el tendón peroneo lateral largo. En el tubérculo se encuentran inserciones de las vainas fibrosas de los músculos peroneo lateral corto y largo. Por encima del tubérculo se encuentra una región rugosa donde se inserta el ligamento calcaneoperoneo.

La cara interna presenta una concavidad que conforma un canal oblicuo, hacia abajo y hacia delante, denominado canal calcáneo interno, que sirve de alojamiento para los músculos, vasos y nervios que salen de la cara posterior de la pierna hacia la planta del pie. El canal se encuentra limitado por detrás por una tuberosidad y por delante por una fuerte eminencia, el sustentáculo para el astrágalo o sustentaculum tali, donde descansa la parte interna del astrágalo. En zona del canal, por debajo del sustentaculum tali, se halla el surco para el tendón del flexor largo del dedo gordo.

En la cara anterior se puede identificar una carilla articular cóncava de arriba abajo y convexa transversalmente que encaja con la cara posterior del cuboide. Esta carilla articular se asienta sobre la apófisis mayor del calcáneo.

La cara posterior es ancha y rugosa por abajo y lisa y más estrecha por arriba. En la mitad inferior se produce la inserción del tendón de Aquiles.

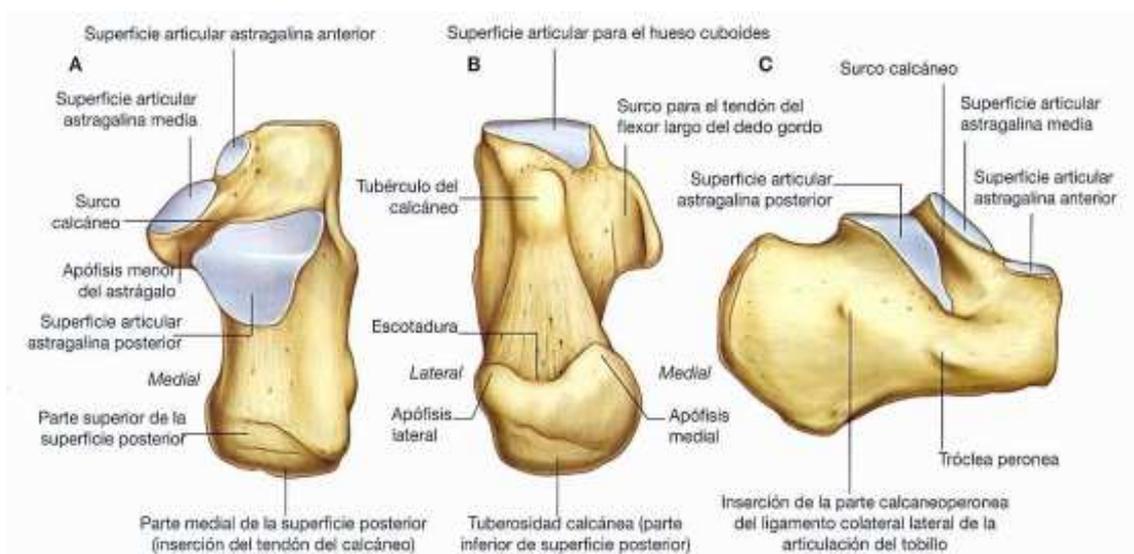


Figura 5: caras del calcáneo.

2.1.1.3. CUBOIDES

El cuboides se sitúa por delante de la apófisis mayor del calcáneo. Por delante articula con los metatarsos y por su región interior se articula con el escafoides o navicular y con la tercera cuña o cuneiforme. Este hueso tiene forma de cubo, de ahí viene su nombre, y por lo tanto, al igual que en el astrágalo y en el calcáneo vamos a distinguir otras seis caras que se van a denominar de la misma manera.

La cara superior o dorsal es plana e irregular y está dirigida hacia arriba y hacia afuera. Aquí se encuentra el ligamento cuneocuboideo dorsal y el musculo extensor corto de los dedos.

En la zona media de la parte cara inferior se observa una eminencia que se dirige de forma oblicua de delante hacia atrás y de fuera a dentro que se denomina tuberosidad o cresta del cuboides, donde se inserta el ligamento calcaneocuboideo plantar. La cara inferior se divide en dos regiones, una posterior rugosa y cóncava y otra anterior, donde se encuentra el canal del cuboides que se dirige de manera oblicua hacia delante y hacia adentro. Este canal es recorrido por el tendón del peroneo largo.

La cara anterior la conforman dos carillas articulares una interna y otra externa que se articulan con el cuarto y quinto metatarso respectivamente.

La cara interna posee una carilla plana y oval que articula con la tercera cuña, otra carilla más pequeña con la que articula con el escafoides o navicular.

La cara externa conforma el borde del pie con una escotadura que da comienzo la canal del peroneo largo.

2.1.1.4. ESCAFOIDES O NAVICULAR

El escafoides o navicular se encuentra encerrado entre cinco huesos con los que a su vez articula, estos huesos son el cuboides, astrágalo y los tres cuneiformes. En este hueso, a diferencia de los anteriores, vamos a observar dos caras, la anterior y posterior, dos bordes, el superior y el inferior y dos extremos, interno y externo.

La cara posterior posee una cavidad profunda y regular tiene forma de un segmento de esfera donde articula con la cabeza redondeada del astrágalo. La cara anterior se divide en tres carillas triangulares divididas por dos crestas, que se articulan con los tres huesos cuneiformes.

El borde superior forma parte de la cara dorsal del tarso y está inclinado hacia abajo y adentro, mientras que el borde inferior es opuesto a este. Los dos bordes son rugosos y en el borde inferior hay una carilla pequeña que articula con el cuboides.

El extremo externo une el borde superior e inferior, mientras que el interno es una eminencia pronunciada, que se denomina tubérculo del escafoides donde se inserta el tendón del tibial posterior.

2.1.1.5. CUNEIFORMES O CUÑAS

Los huesos cuneiformes se encuentran entre los metatarsianos, el escafoides y el cuboides. Se denominan como primera, segunda y tercera cuña, numeradas del interior al exterior del pie o también reciben el nombre de cuña medial, intermedia o lateral según se hallen situados. Se llaman cuneiformes o cuñas debido a la forma de cuña que tienen y como tales, se diferencian en las tres cuñas, cuatro caras una base y un vértice.

La primera cuña se encuentra en el borde interno del pie, posee su base en la planta del pie y su vértice en la parte superior.

La cara posterior es triangular y cóncava y se articula con la cara inferior del escafoides

La cara anterior tiene una superficie articular ancha y convexa que articula con la región posterior del primer metatarsiano.

La cara interna es rugosa con una ligera conicidad en la zona central y se sitúa en el borde interno del pie. En la parte inferior se inserta el tendón tibial anterior.

La cara externa posee dos carillas articulares, una en la zona anterior, pequeña y que articula con el segundo metatarsiano, y otra en la zona posterior, más grande, que se articula con la segunda cuña.

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

La base se encuentra en la planta del pie, es ancha y se insertan algunos ligamentos y el tendón del tibial posterior.

El vértice o borde superior se encuentra orientado hacia el dorso del pie. La parte posterior de la cuña es delgada y cortante, mientras que la zona anterior, donde articula el segundo metatarsiano es más gruesa.

La segunda cuña es la más pequeña de las tres, pero esta, a diferencia de la anterior, posee su base en la parte superior y su vértice se encuentra en la planta del pie.

La cara posterior es cóncava y triangular y se articula con la carilla media del escafoides.

La cara anterior también es triangular y articula con la región posterior del segundo metatarsiano.

La cara interna tiene forma de cartabón y con una superficie rugosa donde se insertan los ligamentos interóseos.

La cara externa es una cara rugosa y que articula con la tercera cuña.

La base de la cuña se encuentra en parte superior del pie, en la zona dorsal, con forma de cuadrilátero y rugosa.

El vértice se encuentra en la planta del pie, es delgado y cortante.

La tercera cuña es de tamaño intermedio en comparación con las otras dos, con una forma parecida a la segunda.

La cara posterior se corresponde con la carilla externa del escafoides y tiene forma plana.

La cara anterior también, plana y triangular, articula con el tercer metatarsiano.

En la cara interna se observa una concavidad rugosa que divide esta cara en dos carillas, anterior y posterior. Esta última, se articula con la región posterior de la cara externa de la segunda cuña. La carilla anterior articula, más pequeña que la posterior, articula con la zona posterior del segundo metatarsiano.

La cara externa, también presenta dos superficies articulares. La carilla posterior, de forma plana y oval, articula con el cuboide, y la anterior, más pequeña, articula con el cuarto metatarsiano.

La base, al igual que la segunda cuña, también se encuentra en la parte superior del pie y tiene forma cuadrangular y su superficie es rugosa.

El vértice descansa en la región plantar.

2.1.2. HUESOS DEL METATARSO

La zona del metatarso está constituida por cinco huesos, los cinco metatarsianos, que van numerados de dentro del pie hacia fuera. Se encuentran delante de la segunda fila del tarso y detrás de las falanges. Se encuentran separados entre sí por un espacio oval, que recibe el nombre de espacio interóseo.

Los metatarsianos son un conjunto de huesos largos en los que se percibe un extremo posterior, un extremo anterior, el cuerpo y la cara superior, interna y externa.

El cuerpo tiene una cierta concavidad en su parte inferior y su eje se encuentra un poco desviado. Tiene forma de prisma triangular.

La cara superior se encuentra en el dorso del pie y, la interna y externa describen los espacios interóseos.

El extremo posterior tiene forma de cuña de base cuadrangular que forma parte de la región dorsal del pie y en la que su vértice se orienta hacia la planta. Este extremo presenta cinco carillas, dos de ellas no articulares y las otras articulares. Las tres carillas articulares se dividen en dos laterales y una posterior. La posterior de forma triangular, articula con la zona anterior del tarso. Las carillas laterales se articulan con los metatarsianos contiguos y por debajo suelen presentar rugosidades para inserciones ligamentosas.

El extremo anterior o distal es una cabeza articular plana transversalmente. Su articulación se denomina condilea, como ya veremos más adelante. La parte superior está limitada por la ranura transversal mientras que por abajo se prolonga un grueso tubérculo escotado en la región media para el paso de los tendones de los flexores. En los laterales

presenta una fosa rugosa y un tubérculo para la inserción de los ligamentos laterales de la articulación metatarsofalángica.

Los metatarsianos difieren entre sí por su tamaño y longitud, siendo el más corto el primer metatarsiano pero a su vez es el más voluminoso. El quinto por el contrario es el menos voluminoso y más corto que los otros metatarsianos. El segundo es el más largo y el tercero y el cuarto son de longitudes similares.

2.1.2.1. PRIMER METATARSIANO

El extremo posterior del primer metatarsiano presenta una media luna articular con su concavidad hacia afuera que articula con la primera cuña en la zona superior delantera en la región externa del extremo puede haber una carilla que articula con el segundo metatarsiano. En la zona inferior se encuentra la llamada apófisis del primer metatarsiano donde se inserta el tendón del peroneo largo.

El extremo anterior tiene forma de cuadrilátero y es de mayor dimensión en comparación con los extremos anteriores de los demás metatarsianos. Posee dos ranuras anteroposteriores de fondo liso separadas por una cresta obtusa, que se encuentran articuladas con los sesamoideos medial y lateral.

2.1.2.2. SEGUNDO METATARSIANO

El extremo posterior posee una cara triangular cóncava que articula con la segunda cuña. En la parte interna se aprecia una carilla, que sirve de articulación con la primera cuña, y delante de esta otra, que se articula con el primer metatarsiano. En la zona externa hay un canal rugoso que divide esta zona en dos carillas, superior e inferior, que a su vez se encuentran divididas en otras dos carillas por medio de una cresta vertical. De este modo nos encontramos con cuatro carillas, las dos posteriores para articular con la tercera cuña y las dos anteriores para articular con el tercer metatarsiano.

2.1.2.3. TERCER METATARSIANO

En el extremo posterior se percibe una carilla triangular de base superior que articula con la tercera cuña. En la zona medial presenta otras dos carillas más pequeñas, superior e inferior, que articulan con las dos del

segundo metatarsiano. En la zona lateral se encuentra otra carilla, plana y oval, que se articula con el cuarto metatarsiano.

2.1.2.4. CUARTO METATARSIANO

Este articula en su extremo posterior con el cuboides, en una superficie plana. En la zona medial de este extremo y a lo largo de la cara dorsal se aprecian dos carillas, separadas por una cresta vertical. La carilla que se sitúa delante, articula con el tercer metatarsiano mientras que la segunda carilla que se encuentra detrás articula con la tercera cuña. En la región lateral, se encuentra otra carilla que se articula con el quinto metatarsiano.

2.1.2.5. QUINTO METATARSIANO

Este hueso en su extremo posterior posee dos carillas, una posterior con forma de triángulo de base interna y con el vértice dirigido hacia fuera, que articula con el cuboides. La otra se encuentra en la parte interna y se articula con el cuarto metatarsiano. Este extremo se prolonga hacia atrás y hacia fuera en la denominada apófisis del quinto metatarsiano o tubérculo del quinto metatarsiano, donde se inserta el tendón del peroneo corto.

2.1.3. LAS FALANGES

Se encuentran situadas por delante del metatarso y articulan en su zona posterior con los metatarsianos. Forman los cinco dedos del pie. Las falanges lo conforman tres huesos, distal, proximal y medial. El dedo gordo solo está formado por dos, la falange proximal y distal.

Las falanges proximales tienen un cuerpo muy delgado y aplanado de arriba abajo y es cilíndrico y aplanado transversalmente.

Las falanges mediales son de menor tamaño que las anteriores.

Las falanges distales son muy cortas y terminan en una semicorona que forma la base del dedo y la uña. El borde lateral tiene una escotadura para el paso de filetes vasculares y nerviosos.

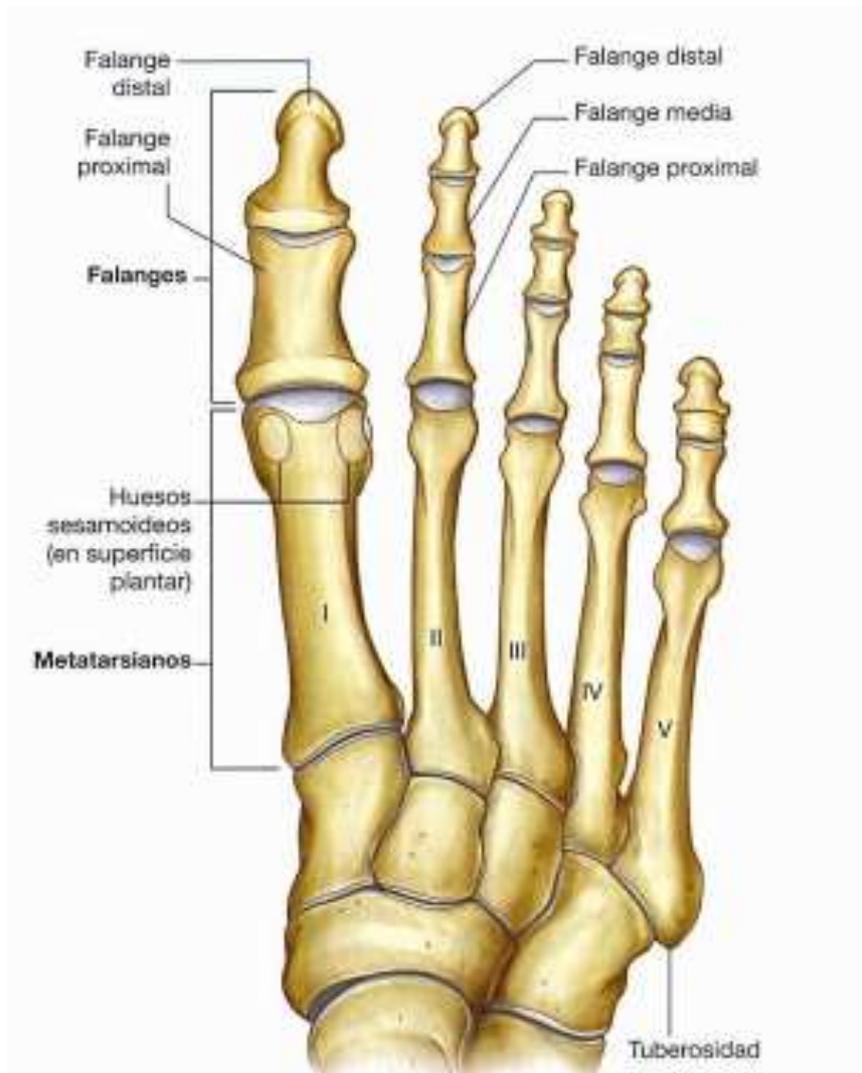


Figura 6: metatarsianos y falanges.

2.2. ARTICULACIONES DEL PIE

Se denomina articulación al conjunto de partes blandas que constituyen la unión de dos o más huesos próximos cuya función es proporcionar a las palancas óseas el movimiento y proporcionar estabilidad sin interferir en el movimiento.

Se clasifican según su estructura. Pueden ser: sinartrosis (sin movilidad), anfiartrosis (poca movilidad) y diartrosis (mucha movilidad). Las que nos interesan conocer a nosotros son estas últimas.

Las articulaciones diartrosicas pueden ser:

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

- Enartrosis (3 ejes). Es triaxial y posee tres grados de libertad. Realiza movimientos de abducción- aducción, flexión-extensión y rotaciones.
- Silla de montar o encaje recíproco (2 ejes). Es biaxial y permite dos grados de libertad de movimiento, abducción-aducción y flexión-extensión.
- Cóndileas (2 ejes). Es igual que la anterior
- Trocoide o en pivote (1 eje). Tiene un grado de libertad de movimiento, el de pronación-supinación.
- Trocleares o bisagra (1 eje). Se denomina también articulación en polea, es uniaxial y permite un grado de libertad de movimiento, flexión-extensión.
- Artrodias (no axiales). No posee ejes de movimiento. Realiza pequeños movimientos de deslizamiento.

Algunas de las articulaciones que vamos a ver pertenecen a los tipos de articulación que hemos nombrado.

Las articulaciones que observamos en el pie son las siguientes:

- Las de la primera fila del tarso. Son la astrágalo-calcánea y se descompone en dos, una anterior artrodia y una posterior trocoide
- La segunda fila del tarso. Escafoideo-cuboidea, las tres escafoideo-cuneales y la cuneocuboidea. Estas tres articulaciones son Artrodias.
- La articulación entre la primera fila y segunda fila del tarso se denomina articulación mediotarsiana o articulación de Chopart, formada por dos, la astragaloescafoidea, que es una enartrosis, y la calcaneocuboidea, que es una articulación de encaje recíproco o silla de montar
 - la articulación entre el tarso y el metatarso se denomina tarso-metatarsiana o de Lisfranc y es una artrodia.
 - La articulación entre el metatarso y las falanges es la metatarso-falángica y son articulaciones cóndileas
 - Las articulaciones de las falanges conocen como interfalángicas trocleares

Las principales articulaciones donde se producen movimientos son la subastragalina, la astragalocalcaneonavicular y la calcaneocuboidea, que conforman la articulación de Chopart.

Las articulaciones entre los cuneiformes y entre estos y el escafoides o navicular permiten solo un movimiento limitado.

2.2.1. ARTICULACIÓN SUBASTRAGALINA.

Esta articulación se da entre la carilla calcánea posterior, situada en la superficie inferior del astrágalo y la carilla astragalina posterior, situada en la superficie superior del calcáneo.

La zona articular se encuentra recubierta de una membrana sinovial que se cubre de una membrana fibrosa. Esta articulación permite el deslizamiento y rotación que se lleva a cabo en la inversión y eversión del pie.

Los ligamentos que se encargan de estabilizar esta articulación son los astragalocalcaeos lateral, medial, posterior e interóseo. El astragalocalcáneo y el interóseo se encuentran en el seno del tarso.

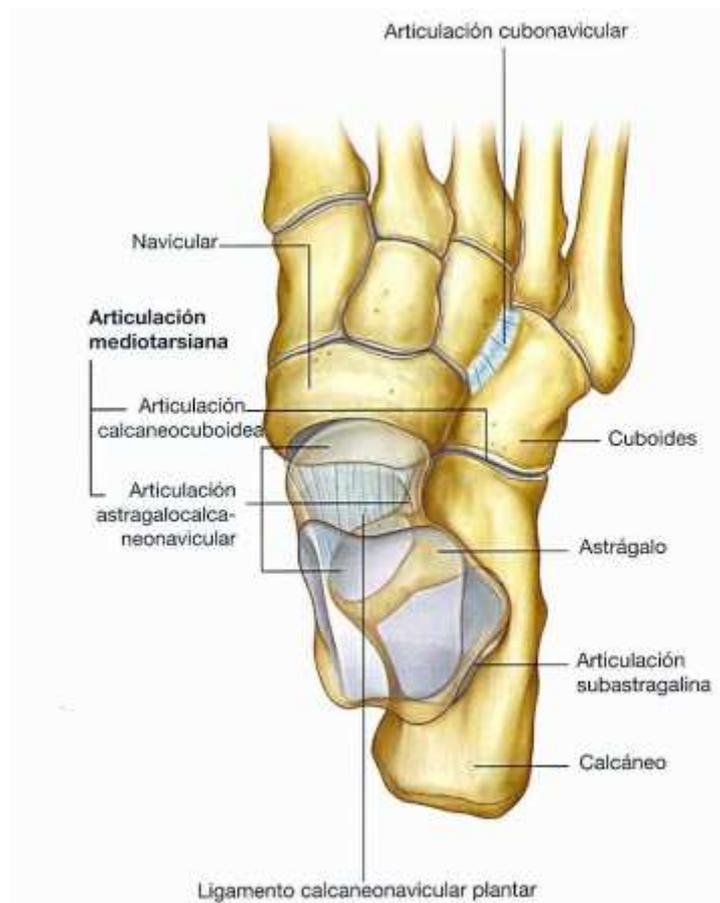


Figura 7: articulación subastragalina. Vista superior.



Figura 8: Articulación subastragalina. Visión lateral.

2.2.2. ARTICULACIÓN ASTRAGALCALCANEONAVICULAR

Es una compleja articulación que articula la cabeza del astrágalo con el calcáneo y con el ligamento calcáneoonavicular plantar por debajo, y con el navicular por delante. Permite realizar movimientos de deslizamiento y rotación que junto con movimientos parecidos a los de la articulación subastragalina permiten llevar a cabo la inversión y eversión, y la pronación y supinación del pie.

Las zonas de la articulación astragalocalcaneonavicular entre el astrágalo y el calcáneo son las carillas calcáneas anterior y media de la superficie inferior de la cabeza astragalina y las carillas, anterior y media, situadas en la superficie superior y en el sustentáculo del astrágalo, respectivamente, del calcáneo.

La zona donde se articula el astrágalo y el ligamento calcáneoonavicular plantar se encuentra entre el ligamento y la carilla medial, que se encuentra en la superficie inferior de la cabeza del astrágalo.

La parte más grande de la articulación, es la articulación entre el navicular y el astrágalo. Se encuentra entre el extremo ovoide anterior de

la cabeza del astrágalo y la superficie cóncava posterior de la zona navicular.

La capsula de esta articulación es sinovial y se encuentra reforzada en la zona posterior por el ligamento astragalocalcaneo interóseo. En la zona superior esta reforzada por el ligamento astragalonavicular que encuentra situado entre el cuello del astrágalo y zonas adyacentes del navicular. Y en la zona inferior por el ligamento calcáneonavicular plantar

La región lateral de la articulación astragalocalcaneonavicular está reforzada en la zona calcáneonavicular del ligamento bifurcado o ligamento en Y. La base de este ligamento se inserta en la cara anterosuperior del calcáneo y las bifurcaciones se insertan en el ligamento calcaneocuboideo y en el ligamento calcáneonavicular

El ligamento calcáneonavicular plantar es un ligamento ancho y grueso que va desde la zona de atrás del sustentáculo del astrágalo hasta el la zona delantera del hueso navicular. Da sujeción a la cabeza del astrágalo y resiste la depresión del arco medial del pie.

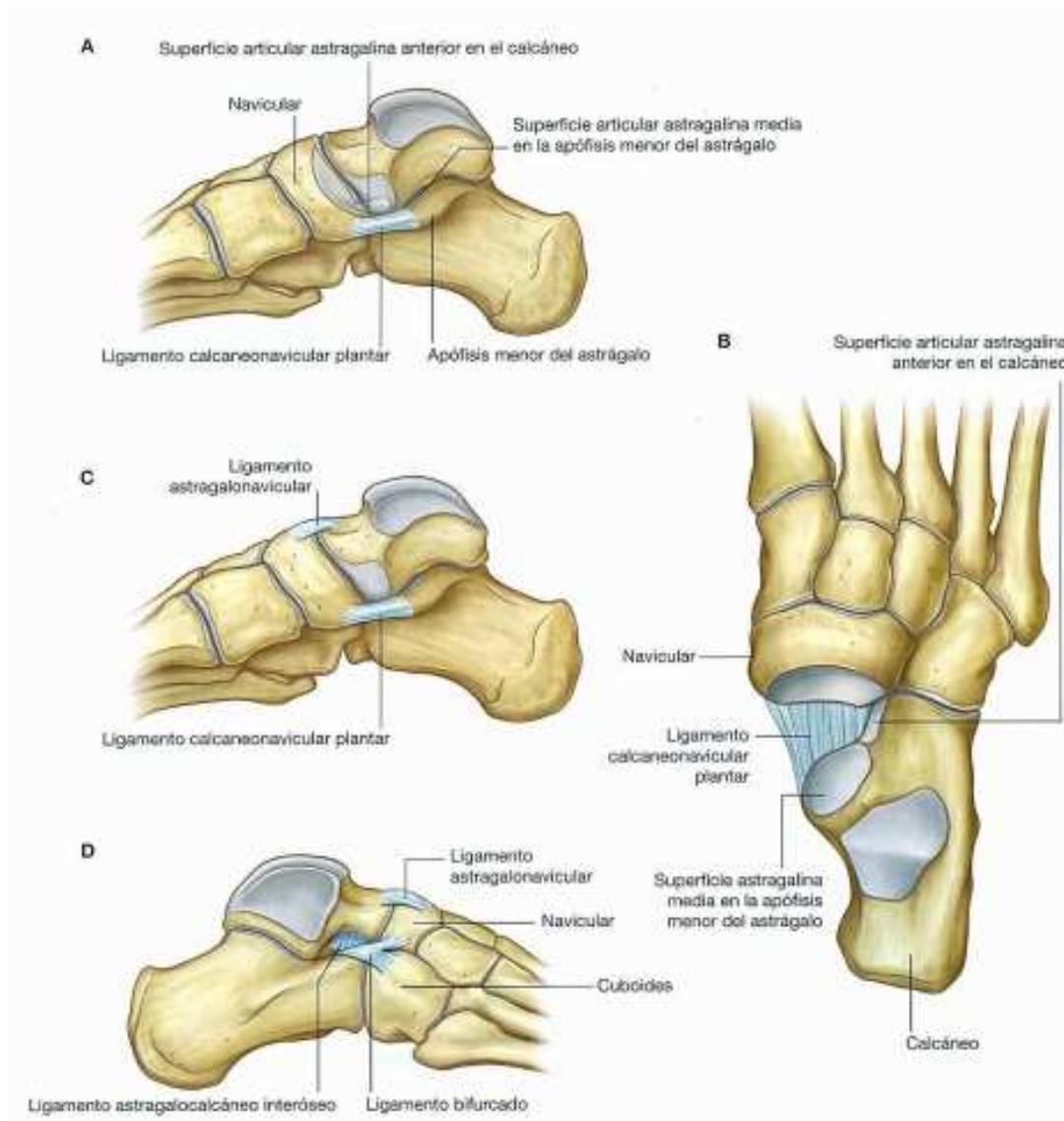


Figura 9: articulación astragalocalcaneonavicular.

2.2.3. ARTICULACIÓN CALCANEOCUBOIDEA

Es una articulación sinovial entre la carilla anterior del calcáneo y la carilla posterior del cuboides. Gracias a esta articulación se pueden llevar a cabo los movimientos de deslizamiento y rotación que participan en la inversión y eversión contribuyendo a la pronación y supinación del pie.

La articulación calcaneocuboidea esta reforzada por el ligamento bifurcado, los ligamentos plantar largo y el ligamento plantar corto. Este último, también conocido como ligamento calcaneocuboideo plantar, es ancho y fuerte, y conecta con el tubérculo calcáneo anterior con la cara inferior del cuboides. Da sustento a la articulación calcaneocuboidea y, además, ayuda al ligamento plantar largo, el más largo de los ligamentos

del pie, a soportar la depresión del arco lateral del pie. Se inserta en la zona posterior del pie, entre la tuberosidad y el tubérculo de la cara inferior del calcáneo, y en la zona anterior, se inserta en una cresta y en un tubérculo situado en la cara inferior del cuboides, por detrás del surco para el tendón del peroneo largo.

El ligamento plantar largo soporta la articulación calcaneocuboidea y es el ligamento más fuerte, resiste la depresión del arco lateral del pie. Las fibras más superficiales de este abarcan las bases de los metatarsianos.

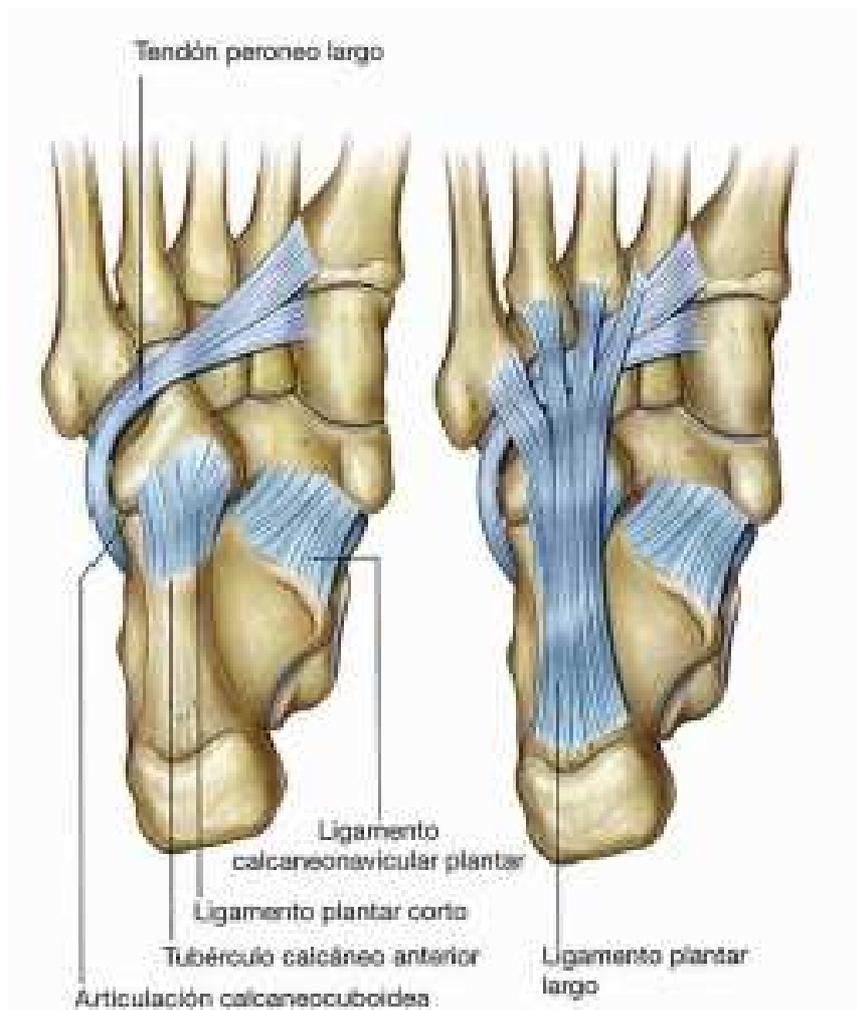


Figura 10: articulación calcaneocuboidea.

2.2.4. ARTICULACIONES TARSOMETATARSIANAS

También es conocida como la articulación de Lisfranc, se produce entre las bases de los metatarsianos y los huesos adyacentes del tarso, que

son los cuneales y el cuboides. Son articulaciones planas que solo permiten movimientos limitados de deslizamiento.

La amplitud de movimientos de la articulación tarsometatarsiana, entre el metatarsiano del dedo gordo y el cuneiforme medial, es mayor que la de las otras dos articulaciones y permite movimientos de flexión, extensión y rotación. Esta articulación también participa en la pronación y supinación del pie.

2.2.5. ARTICULACIONES METATARSOFALÁNGICAS.

Son articulaciones sinoviales elipsoidales que se dan entre las cabezas de forma esférica de los metatarsianos y las bases de las falanges proximales con las que articulan cada uno. Permiten movimientos de extensión y flexión, aunque los movimientos de abducción, aducción, rotación y circunducción están más limitados.

Los ligamentos colaterales, mediales y laterales, y los ligamentos plantares refuerzan las capsulas articulares. Poseen surcos en su superficie para la inserción de los tendones largos de los dedos.

Los ligamentos metatarsianos transversos y profundos son cuatro y se encargan de unir las cabezas de los metatarsianos, formando una estructura unificada. Los ligamentos plantares de las articulaciones metatarsofalángicas se encuentra superpuestos a los anteriores.

El primer metatarsiano tiene la misma orientación que los demás metatarsianos y se une con el segundo mediante el ligamento metatarsiano profundo. La articulación del primer metatarsiano con el cuneiforme medial posee una amplitud de movimiento bastante limitada, quedando la función del dedo gordo del pie muy restringida, al contrario que el pulgar de la mano.

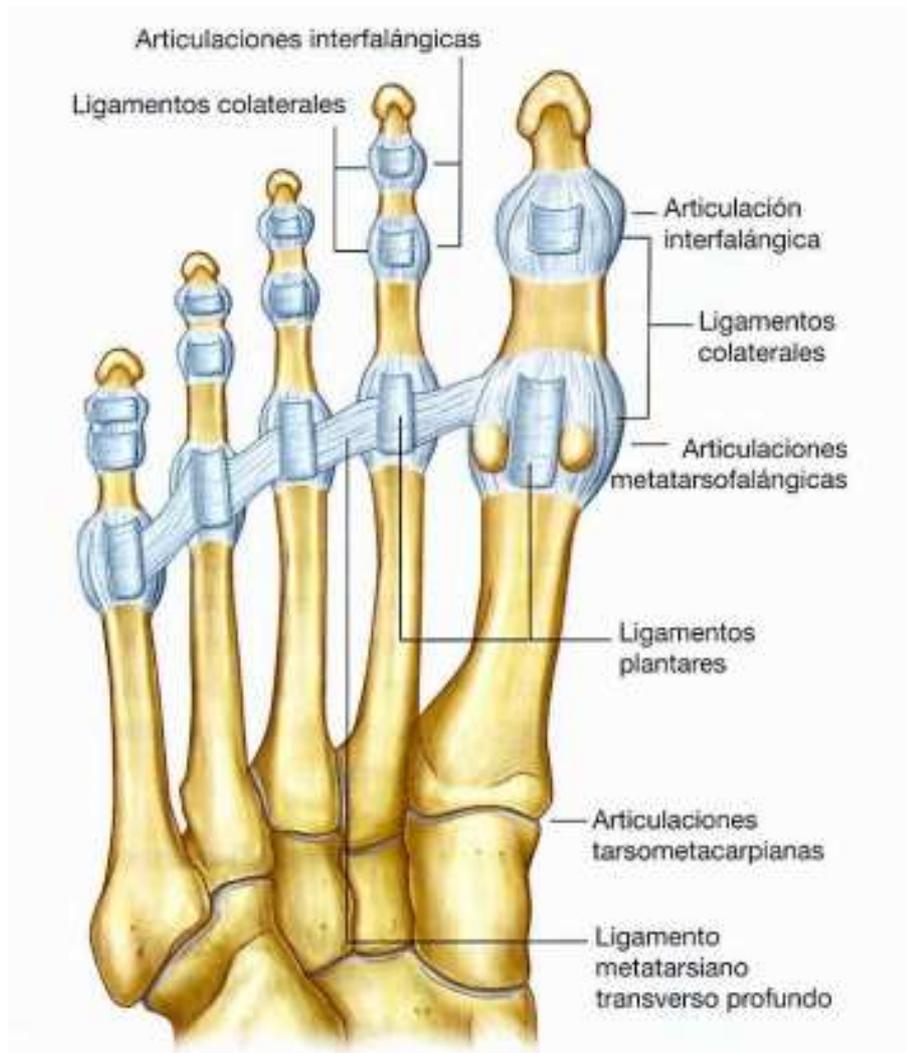


Figura 11: articulaciones metatarsofalángicas y tarsometatarsianas.

2.3. ARCOS DEL PIE

Los huesos del pie se encuentran dispuestos formando arcos, longitudinal y transverso con respecto al suelo. De esta manera se favorece la absorción de las fuerzas del cuerpo cuando está en movimiento y cuando está en bipedestación

El arco longitudinal del pie va desde el extremo posterior del calcáneo hasta la cabeza de los metatarsianos. Se divide en el arco longitudinal medial y el arco longitudinal lateral. La zona más alta se encuentra en la parte medial del arco y la más baja en su parte lateral.

El arco transverso del pie es más alto en el plano coronal que cruza la cabeza del astrágalo y desaparece cerca de las cabezas de los metatarsianos

que se encuentran unidos gracias a los ligamentos metatarsianos transversos profundos.

Los ligamentos encargados de mantener estos arcos son el calcáeonavicular plantar, el calcaneocuboideo plantar, el plantar largo y la aponeurosis plantar.

Los músculos que proporcionan apoyo dinámico durante la marcha son el tibial anterior, el posterior y el peroneo largo.

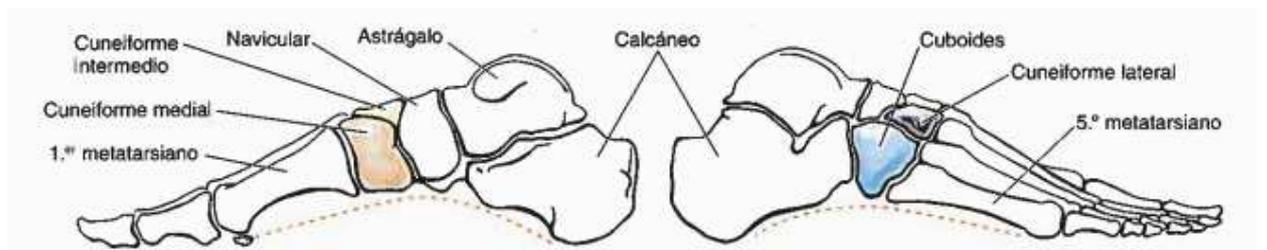


Figura 12: arco longitudinal medial y arco longitudinal lateral del pie.



Figura 13: arco transversal y arcos longitudinales.

2.4. FASCIA PROFUNDA DEL PIE

La fascia profunda del dorso del pie es delgada en la continuación del retináculo inferior de los músculos extensores. En las caras posterior y lateral del pie la fascia profunda se continúa con la fascia plantar, dando lugar a la fascia profunda del pie.

La fascia plantar se divide en una porción más gruesa denominada aponeurosis plantar y unas porciones, lateral y medial, más delgadas. Se encarga de mantener unidas distintas zonas del pie así como proteger contra lesiones y mantener los arcos longitudinales del pie.

La aponeurosis plantar la componen una serie de haces longitudinales de tejido conjuntivo fibroso denso que recubren los

músculos centrales de la planta del pie. Se origina en el calcáneo y actúa como ligamento superficial. Los haces longitudinales de las fibras de colágeno se dividen en cinco bandas fibrosas que se continúan con las vainas fibrosas de los dedos y rodean a los tendones de los flexores. La aponeurosis plantar se refuerza en el extremo anterior de la planta, por debajo de las cabezas de los metatarsianos, mediante fibras transversales que dan lugar al ligamento metatarsiano transversal superficial.

La planta del pie está dividida en tres compartimentos, por tabiques intramusculares verticales, que se extienden desde los márgenes de la aponeurosis plantar hacia el primer y quinto metatarsiano.

El compartimento medial está cubierto por la fascia plantar medial y contiene al abductor del dedo gordo, el flexor corto del dedo gordo y al tendón del flexor largo del dedo gordo, a parte del nervio y los vasos plantares mediales.

El compartimento central está recubierto por la aponeurosis plantar. Contiene el flexor corto de los dedos los tendones del flexor largo del dedo gordo y el flexor largo de los dedos, además del músculo cuadrado plantar, músculos lumbricales y el abductor del dedo gordo. Se encuentran aquí también el nervio y los vasos laterales plantares.

El compartimento lateral está recubierto por la fascia plantar lateral y contiene al abductor y flexor corto del dedo pequeño.

En el antepié podemos encontrar un cuarto compartimento, el compartimento interóseo del pie, que se encuentra rodeado por la fascia plantar y dorsal. Envuelve a los metatarsianos, los músculos interóseos dorsales y plantares, y los vasos plantares profundos y metatarsianos.

El compartimento dorsal del pie se encuentra entre los huesos del tarso y la fascia interósea dorsal del mediopié y el antepié. Contiene los músculos y las estructuras vasculonerviosas del dorso del pie.

3. BIOMECÁNICA DEL PIE

La biomecánica del pie es compleja. Al caminar se produce una rotación en el plano transversal, que va desde la pelvis hasta la tibia y el peroné, y se transmite al tobillo, que a la vez transmite el movimiento a la articulación subastragalina hasta los huesos del pie.

El pie es una estructura que se adapta a las distintas situaciones de la fase de la marcha, pudiendo ser rígido o flexible según lo precise.

Durante la etapa de oscilación y temprana postura o apoyo de la marcha, el pie se vuelve flexible, convirtiéndose luego en una estructura rígida hasta poco antes del levantamiento del pie.

Esta característica del pie resulta una gran ventaja, ya que permite la adaptación a los distintos terrenos que se puede encontrar, así como, su rigidez funciona como palanca cuando el cuerpo avanza.

Durante la marcha normal, la sección inferior del cuerpo rota sobre el plano transversal incrementando los segmentos más lejanos a la cadera. En un terreno plano, durante la marcha, la pelvis rota alrededor de unos 6° , el fémur 13° y la tibia un 18° . Durante la etapa de oscilación y en la etapa inicial de apoyo, la rotación es interna, invirtiéndose seguidamente para empezar la rotación externa hasta antes del despegue de los dedos, comenzando de nuevo la rotación interna y volviéndose a repetir el ciclo.

3.1.EJES DE ARTICULACIÓN

El eje de rotación del tobillo se orienta lateralmente y posteriormente en el plano transversal, y de manera lateral y hacia abajo en el plano frontal. El ángulo formado entre el eje del tobillo y de la tibia es de 80° con un margen de movimiento de 68° y 88° .

Si el enfoque lo realizamos desde el plano transversal se observa una rotación de entre 20° y 30° con respecto al eje de la rodilla, perpendicular al avance.

Con respecto al eje longitudinal del pie y el eje de rotación del tobillo, se forman un ángulo de 84° .

Todo esto indica que el pie rota internamente 6° con respecto al eje longitudinal, que pasa entre el segundo y tercer dedo. El rango de movimiento interno es de 21° y 9° de rotación externa.

El eje de rotación de la articulación subastragalina es oblicuo. En el plano transversal forma 23° con la línea central del pie y puede realizar un movimiento que va entre 4° y 47° . En el plano horizontal forma un ángulo de 41° , con un mismo margen de movimiento de entre 21° y 69° .

Cuando se produce una rotación en la parte superior del astrágalo, se transmite al calcáneo en sentido inverso. Es decir, cuando se realiza una rotación externa en la pierna se produce inversión en el calcáneo, y cuando se realiza una rotación interna se produce una eversión en el calcáneo. Estos movimientos se realizan gracias a la articulación subastragalina. Se denomina inversión cuando el astrágalo es atraído hacia la parte interna del cuerpo, y se cuándo se aleja de la línea que pasa del centro del cuerpo se denomina eversión. La inversión máxima que puede realizar el pie, es de aproximadamente 30° y la eversión máxima es de 10° . Si estos ángulos se ven superados, se producirán lesiones ya sea en los huesos o en los ligamentos.

Durante la etapa de postura se produce una inversión de 8° aproximadamente, así como cierta eversión, pero únicamente durante el 15% inicial de esta etapa.

Cuando se realiza el movimiento de inversión, en la zona interna del pie, se produce una pequeña elevación y la zona externo sufre una depresión. Todo esto sucede de manera contraria cuando se provoca una eversión.

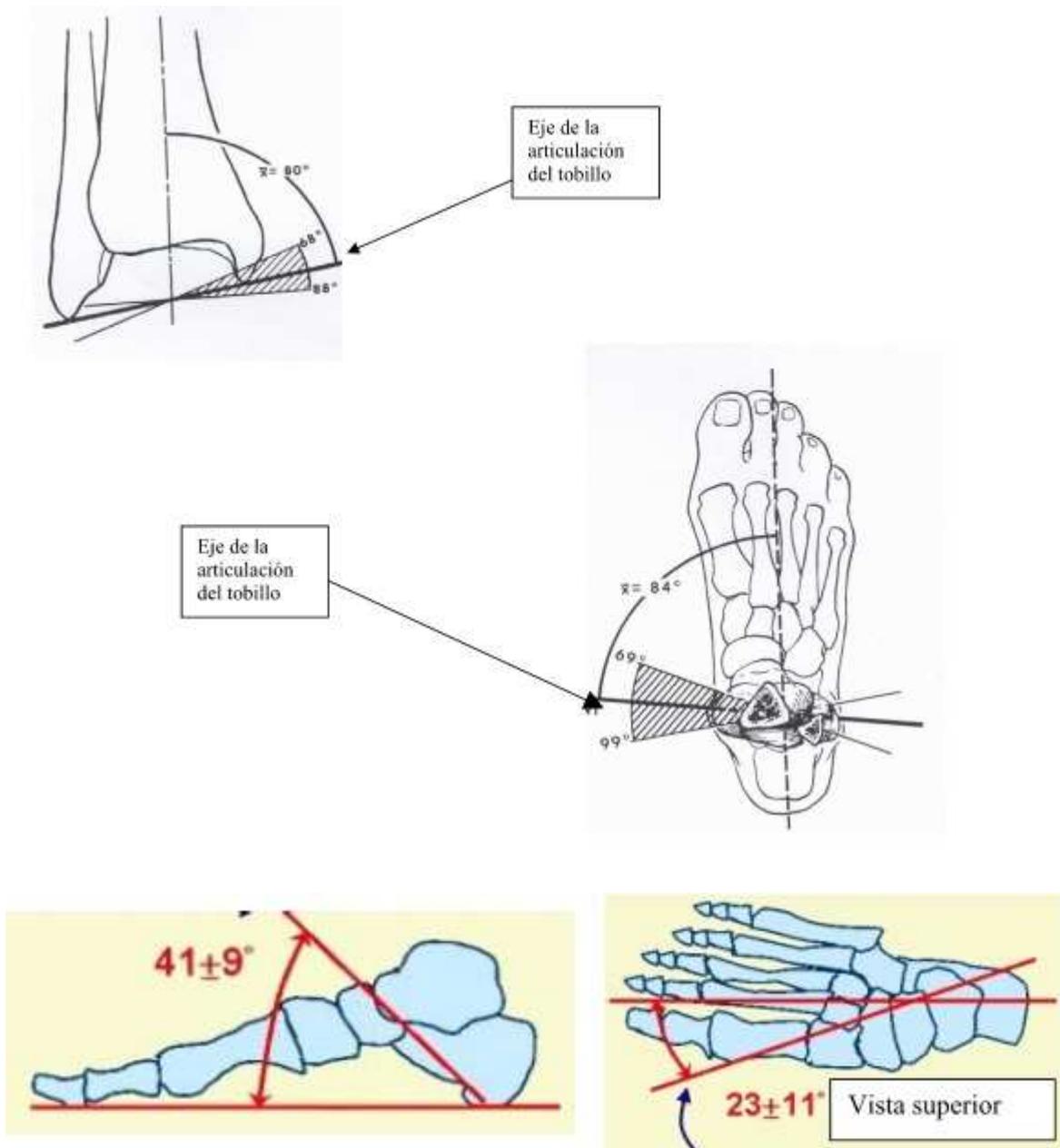


Figura 14: ejes de articulación del tobillo.

3.2. ACCIÓN DE LOS MUSCULOS DEL PIE

Los músculos que recubren la tibia y el peroné realizan un trabajo fundamental para llevar a cabo los movimientos del pie. Su ubicación indica el tipos de movimientos realiza el pie. Es decir, los músculos situados detrás del eje del tobillo, realizaran trabajos de flexión plantar y los que se sitúen por delante realizaran un trabajo de dorsiflexión. Así mismo los músculos que se encuentren en la parte interna, con respecto al eje de la articulación subastragalina, son los encargados de la inversión, y

los que se encuentran en la zona externa producen el movimiento de eversión.

La mayor parte de la actividad de los músculos encargados de la dorsiflexión se lleva a cabo durante la etapa de oscilación y durante el inicio de la etapa de postura, cuando existe apoyo en el pie.

La función principal es mantener el tobillo en dorsiflexión durante la oscilación y controlar la flexión plantar después del contacto inicial. En el caso en que estos fallaran, la cadera y la rodilla aumentarían su flexión en compensación, provocando alteraciones en la marcha.

Los músculos situados por detrás del tobillo, que llevan a cabo la flexión plantar, presentan actividad en la fase de postura media. Si se produce fallo de estos músculos, el tobillo entra en una dorsiflexión después del contacto con el suelo, aumentando la flexión en la rodilla y produciendo una marcha encorvada.

En general, los músculos situados detrás del eje del tobillo se encargan de la fase de postura, los situados delante se encargan de la oscilación y los que se encuentran ubicados en el pie trabajan durante la etapa media de postura hasta que los dedos despegan del suelo.

3.3.ABSORCIÓN DEL IMPACTO

Durante la marcha se genera una fuerza del 80% del peso corporal en el momento del contacto del pie con el suelo, pudiendo llegar hasta el 115%. Durante la carrera la fuerza de contacto generada va desde el 150% hasta el 275%. El tobillo se encarga de absorber toda esta fuerza generada.

El mecanismo de absorción se basa en el movimiento desarrollado por las articulaciones en el momento del contacto con el suelo

4. CICLO DE LA MARCHA

El ciclo de la marcha se divide en dos fases, oscilación y apoyo, que se van alternando. La fase de apoyo da comienzo cuando el talón contacta con el suelo y carga con todo el peso del cuerpo, golpe de talón. Y finaliza con el despegue del antepié debido a la flexión plantar.

Justo después del despegue da comienzo la fase de oscilación, cuando el pie deja de estar en contacto con el suelo, y finaliza cuando el talón apoya de nuevo con el suelo. En porcentaje, la fase de oscilación ocupa el 40% del total del ciclo de la marcha y el 60% restante lo ocupa la fase de apoyo. La fase de apoyo es más duradera que la fase de oscilación debido a que se divide en periodos cortos de apoyo bipodal, transmitiendo el peso de un pie al otro, y otro periodo, de mayor duración, de apoyo monopodal, en el que un pie soporta todo el peso del cuerpo.

Durante la carrera no se produce apoyo bipodal y por lo tanto se reduce el porcentaje de la fase de apoyo durante el ciclo de la marcha.

La energía que se utiliza para el ciclo es a mínima, ya que se vale de la gravedad y momentos generados que requieren muy poco esfuerzo.

Gran parte de la energía se utiliza en la contracción excéntrica de los flexores dorsales en la fase de apoyo inicial, cuando el talón desciende tras el golpe de talón, y al final del apoyo, cuando los flexores plantares se contraen concéntricamente para impulsar a los metatarsianos y falanges para producir el despegue, proporcionando la mayor parte de la fuerza de propulsión.

Durante el despegue los dedos se contraen, aumentando así el despegue, que se inicia por debajo de las cabezas de los dos metatarsianos mediales. Los músculos intrínsecos y los flexores largos se encargan de estabilizar el antepié y los dedos, aumentando de esta manera, el efecto de la flexión plantar en el tobillo y la flexión de los dedos.

En la fase de oscilación, la flexión de la cadera acelera el miembro libre de forma más rápida que el movimiento del cuerpo en el sentido de la marcha. En la oscilación inicial, la rodilla se flexiona casi a la vez aprovechando el momento de fuerzas, seguido por la flexión dorsal en la articulación del tobillo. Estos movimientos producen el acortamiento del

miembro libre, haciendo que este oscile hacia delante y se aleje del suelo. En la oscilación media se añade la extensión de la rodilla a la flexión y el momento de fuerzas del muslo., realizándose completamente la oscilación anterior.

La contracción excéntrica, en la oscilación terminal, de los extensores de la cadera y los flexores de la rodilla, producen la deceleración del movimiento hacia delante. Los cuádriceps se contraen para extender la pierna y colocar el pie para el golpe de talón. Esta contracción continua en la fase de carga mediante del golpe de talón para absorber el impacto y evitar la flexión lateral de la rodilla, hasta que alcance la extensión completa. En la fase de oscilación, el lado no apoyado tiende a descender, para evitarlo, los abductores del lado apoyado se contraen durante la fase de apoyo monopodal, de esta manera se impide el acortamiento del miembro. Los abductores tiran del fémur para impedir la inclinación y nivelar la pelvis.

Estas acciones se alternan de un lado a otro durante el ciclo. La cadera actúa pasivamente debido al momento de fuerzas, excepto al acelerar, andar rápidamente o al subir una cuesta, que aumenta su actividad. La flexión concéntrica de la cadera y la flexión de la rodilla actúan en la fase de oscilación en terreno llano, y no se ven afectadas por el peso corporal. Sin embargo en acciones como desacelerar o bajar una pendiente, se necesita una contracción excéntrica.

Los músculos que llevan a cabo la inversión y la eversión del pie son los encargados de dar estabilidad durante la fase de apoyo. Los largos tendones de estos músculos y los de los flexores de los dedos sostienen el arco del pie en la fase de apoyo.

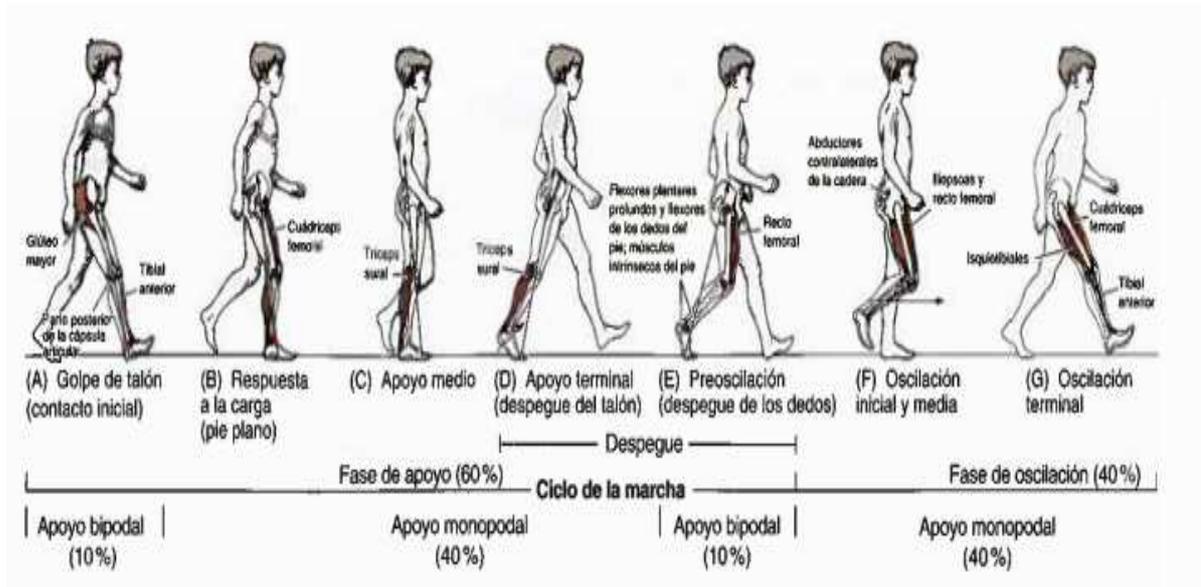


Figura 15: ciclo de la marcha.

5. PATOLOGÍAS

5.1.METATARSALGIA

Consiste en un dolor en la zona del metatarso, uno de los puntos del pie sobre los que se apoya el peso del cuerpo. La metatarsalgia se produce cuando esta zona sufre lesiones o deformaciones debido al mal apoyo o apoyo excesivo con el movimiento. Supone un intenso dolor al realizar esfuerzo o ejercicio físico. El dolor va en aumento y cada vez más frecuente, incluso, el afectado puede llegar a sentir dolor sin tener que apoyar el pie.

La causa más frecuente es la alteración biomecánica del pie ya sea por la morfología propia del pie o por el uso de un calzado inadecuado.

Los pequeños nervios que se encuentran entre los huesos metatarsianos se pueden ver presionados, provocando inflamación, causando así la metatarsalgia. Esto puede empeorar si el peso recae aún más sobre los metatarsianos, haciendo que aumente su rozamiento, llegando a provocar la inflamación del nervio, provocando el conocido Neuroma de Morton.

Al iniciar la marcha, la fuerza del peso se transmite desde el pie a la cabeza de los metatarsianos, en su gran mayoría al primer y segundo metatarsiano. La sobrecarga se produce cuando se producen cambios en la manera de transmitir la fuerza a los dedos, originando la inflamación de la zona afectada.

Los factores que dan pie a la aparición de este problema pueden ser:

- El uso de calzado inadecuado
- Personas con sobrepeso
- La edad
- La morfología del pie

Patologías que pueden causar metatarsalgia son:

- Juanetes
- Diabetes
- Gota
- Acumulación de líquido en el pie

- Neuroma de Morton
- Artritis reumatoidea

El tratamiento depende de una evaluación previa del pie del paciente, ya que dependiendo de la causa el tratamiento será distinto.

El tratamiento puede ser conservador, consistente en el uso de ortesis plantares y separadores digitales, o quirúrgico, que podrá ser percutánea o abierta

5.2. FASCITIS PLANTAR

Consiste en la inflamación de la fascia plantar. La causa de esta inflamación es la sobrecarga o el estiramiento excesivo de la planta del pie.

Algunos factores que aumentan el riesgo de padecer fascitis son los siguientes:

- Problemas con el arco del pie, como por ejemplo, pie plano o personas con el arco plantar alto.
- Correr largas distancias sobre superficies irregulares o cuestas
- El sobrepeso o aumento de peso repentinamente
- Calzado inadecuado
- Tener el tendón de Aquiles tenso

Aunque el sexo no es un factor relevante, afecta más a hombres activos entre los 40 y 70 años

El tratamiento, inicialmente, se suele basar en el uso de antiinflamatorios para aliviar el dolor, descanso, uso de un buen calzado, aplicación de hielo o uso de férulas nocturnas.

En caso de que estas medidas no funcionasen, se recomienda el uso de plantillas o botas a modo férula. También se pueden realizar inyecciones de esteroides o inyecciones en el talón.

Cuando ninguna de las medidas anteriores da resultado, se suele recurrir a la cirugía.



Figura 16: fascitis plantar.

5.3. HALLUX VALGUS

Es una de las deformaciones más frecuentes, y afecta al dedo gordo del pie. Es una afección compleja que puede ser congénita o adquirida, que se produce en la articulación metatarsofalángica del dedo gordo del pie y las zonas osteofibrosas de alrededor.

Se produce una desviación de las falanges hacia el lateral y el primer metatarsiano hacia lo medial, dando lugar a una prominencia en la cabeza del primer metatarsiano.

Se producen tres etapas en la evolución del Hallux Valgus.

En la primera, se producen alteraciones en los huesos y músculos de la zona y se da una subluxación en la cabeza del primer metatarsiano. En consecuencia, produce la rotación de las falanges hacia el lateral.

En la segunda, la piel de la zona de la cabeza del primer metatarsiano se forma un tejido esclerosos, calloso y una bolsa serosa que se puede inflamar, infectar o ulcerarse. Esta prominencia que se forma junto con la bursitis, constituye el Hallux Valgus, también conocido como juanete.

Y por último, en la tercera, se produce una deformación irreductible. La articulación presenta lesiones astrósicas y surge un tumor superficial en el metatarsiano

Para el tratamiento se deben tener en cuenta la edad, patogenia y alteraciones en cada caso. El tratamiento también debe contemplar aspectos profilácticos o curativos. El primero considera el uso de calzado adecuado, plantillas separadores, etc. El segundo, es un tratamiento quirúrgico que ha desarrollado numerosas técnicas.



Figura 17: radiografía de un caso de Hallux Valgus.

5.4.DEDOS EN GARRA O MARTILLO

Se da en los dedos del pie, generalmente en el segundo. La causa es el uso de calzado estrecho o pequeño, por ello se puede presentar a cualquier edad.

Se produce una hiperextensión en la primera falange y una flexión en la segunda. Esto conlleva a la aparición de callos y bolsas serosas. El

tratamiento se puede llevar a cabo mediante el uso de plantillas, pero generalmente suele ser quirúrgico, estabilizando la falange con un alambre transarticular de Kirschner.

Se denomina dedo en garra cuando a lo citado anteriormente se le añade una flexión en la tercera falange. En este caso, al tratamiento anterior, se le sumará una capsulotomía dorsal de la articulación metatarsfalángica y el alargamiento de los tendones extensores.



Figura 18: dedos en garra y dedos en martillo.

5.5.ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO

El espolón calcáneo es un crecimiento óseo, en el lugar donde se insertan los tendones de los músculos ya sea del pie o de la pierna. Se diferencian dos tipos de espolones, según en la zona donde se produzca.

El menos común, se produce en la zona posterior superior en la zona de inserción del tendón de Aquiles, se conoce como deformidad de Haglund.

El más común se produce en cara plantar del calcáneo, espolón del calcáneo plantar.

Aparecen debido a la tracción o compresión de los tendones como producto de un sobreesfuerzo o uso de calzado inadecuado, siendo más común la aparición de esta afección en las mujeres.

El dolor que genera el espolón, es causado por estímulos mecánicos externos el tendón o aponeurosis de la planta del pie que provocan la inflamación de la fascia plantar o fascitis plantar.

Las principales causas o factores de riesgo son las siguientes:

- Practica intensa de deporte, especialmente aquellos que solicitan más la articulación del pie.
- Estar de pie o caminar durante largos periodos
- Uso de calzado inadecuado
- Sobrepeso y obesidad

El tratamiento puede consistir en uso de plantillas ortopédicas para disminuir la tensión sobre esta zona y disminuir el dolor. Se recomienda llevar a cabo ejercicios de estiramiento o el uso de férulas para paliar el dolor. En caso de aparecer inflamaciones se puede tratar con antiinflamatorios. También puede tratarse mediante un procedimiento quirúrgico, que consiste en la eliminación del espolón con una incisión pequeña en la piel hasta llegar a la prominencia ósea.



Figura 19: Radiografía de un caso de espolón calcáneo.

5.6. OSTEOCONDritis DE LOS SESAMOIDEOS.

La osteocondritis de los sesamoideos consiste en una necrosis avascular, es decir, una pérdida del riego sanguíneo en los sesamoideos de manera temporal o permanente. Las personas afectadas son más propensas a sufrir fractura por estrés en el sesamoideo afectado como consecuencia de una hipersolicitación de los sesamoideos.

Los causas pueden ser varias, pero la de mayor relevancia es la de sobrecarga mecánica. Los sesamoideos se encuentran sometidos a grandes cargas de tracción, compresión e impactos. Por ello, esta afección la suelen sufrir con mayor frecuencia deportistas de deportes que impliquen saltos o bailarines.

El tratamiento conservador consiste en el uso de plantillas o zapatos con suela de descarga para el sesamoideo afectado.

El tratamiento quirúrgico consiste en la extirpación del sesamoideo afectado o de los dos, siendo esta última más propensa a causar deformaciones en el Hallux.

6. TRABAJO REALIZADO

6.1. PROGRAMAS INFORMÁTICOS

En este apartado vamos a hacer una breve descripción de los programas que hemos empleado para llevar a cabo el proyecto.

6.1.1. I-DEAS

Este software nos permite crear y modificar mallas, en nuestro caso partimos de una malla creada anteriormente para realizar otro estudio del pie. En general, en este proyecto solo se ha modificado la malla de la que partimos y en algún caso muy puntual hemos creado algún elemento, para simular, de una manera más acertada, el proceso llevado a cabo durante uno de los casos que hemos tratado en este estudio.

La malla es una recreación del pie y sus componentes más representativos y que influyen de manera más directa en los cálculos. Está formado por varios tipos de elementos, dependiendo del grupo estructural del pie al que represente, pudiendo ser de tipo tetraédrico para representar los tejidos duros como son el esponjoso, cortical y los cartílagos, y elementos barra para representar tendones y ligamentos. Los vértices de las caras de los elementos tetraédricos y los extremos de los elementos barra, son los nodos, que también los organizaremos en grupos si es necesario.

Una vez que hemos creado los grupos que nos serán útiles en los cálculos que realizaremos en ABAQUS, los exportaremos para obtener un archivo .INP como veremos más adelante.

6.1.2. ABAQUS

ABAQUS es un programa destinado a resolver problemas, ya sean de tipo lineal o no lineal, de ciencias e ingeniería. Está basado en el método de elementos finitos. Este programa es la herramienta con la que podremos visualizar los resultados y trabajar con ellos, realizando los ajustes convenientes para obtener una mayor información, pudiendo así compararlos con los demás obtenidos.

Partiremos del archivo .INP exportado de I-DEAS y lo modificaremos aportando datos como las propiedades de los distintos tejidos que conforman el pie así como las cargas y las condiciones de

contorno. ABAQUS nos mostrará varios resultados pero los que nos serán útiles a nosotros son las tensiones máximas y mínimas, así como los desplazamientos en los tres ejes.

6.2.CASOS A ESTUDIAR

6.2.1. ESPOLÓN CALCÁNEO

6.2.1.1. CIRUGÍA

Vamos a hacer una pequeña descripción, sobre en qué consiste la cirugía.

Es una cirugía mínimamente invasiva. Al paciente se le aplica anestesia local y el mismo día, si no hay complicaciones, se le da de alta. Se le hace una incisión a la altura del espolón con un bisturí y se desinserta la fascia plantar de la zona del espolón, reduciendo así la tensión que hay entre esta y el punto de inserción. El dolor no es producido por el espolón en sí, es producido por este aumento de la tensión en la fascia, que favorece la aparición del espolón. Posteriormente se realiza una lima en la zona afectada hasta que el espolón desaparezca.

En realidad al realizar la operación no se trata el problema en sí, puesto que no se elimina la causa, y después de un periodo de tiempo que en algunos casos puede ser de meses puede volver a aparecer, e incluso puede crearse un espolón de mayor tamaño.

El tiempo de recuperación del paciente puede variar entre quince días hasta un mes.

6.2.1.2. I-DEAS

En I-DEAS simulamos la cirugía llevada a cabo. Para ello extraemos hueso de la zona en la que se encontraría el espolón. Seleccionando uno a uno los elementos que la conformarían.

Aproximadamente tendrá unas dimensiones de 2X2 cm y extraeremos elementos hasta llegar al tejido esponjoso, que no lo tocaremos. En cuanto a la fascia, hemos desinsertado la zona que se encuentra dentro de la zona a extraer. Para simular esto, lo que hemos hecho es crear un grupo en I-DEAS llamado “extracciones” compuesto del

tejido cortical que vamos a extraer al que hemos añadido los músculos flexores cortos y parte de la fascia que se encuentren dentro de la zona del espolón.

Hemos modificado la posición de los flexores largos, para situarlos en una zona más aproximada a la real. Para ello, hemos borrado los elementos que conformaban el grupo de los flexores largos inicialmente y hemos creado nuevos elementos de tipo barra con su nueva posición, en la zona de inserción en el calcáneo, por encima de la zona de extracción.

Para la extracción del tejido cortical, hemos dividido la extracción en tres capas, de distinto color, para facilitar la selección de elementos y para visualizar que las distintas capas tengan una geometría parecida. Una vez creadas las capas comprobamos que no haya elementos sueltos ni sin seleccionar dentro de este nuevo grupo. Para ello creamos un nuevo grupo, a partir del grupo “calcáneo” del que eliminaremos los elementos que forman el grupo “extracciones”, quedándonos el calcáneo sin el tejido cortical extraído, quedando a la vista el tejido esponjoso que no se debe presentar ninguna modificación.

Los grupos que hemos creado y los ya existentes con anterioridad, los exportaremos a ABAQUS, ya sean grupos de nodos como de elementos.

6.2.1.3. ABAQUS

Una vez que hemos exportado los grupos que emplearemos, ya sean para visualizar resultados como para recrear las condiciones de la cirugía, obtendremos un archivo con la extensión .INP que retocaremos para añadir las propiedades mecánicas de los tejidos del pie, las condiciones de contorno, o modificar elementos o grupos que queremos remover del modelo inicial.

Los datos definidos en el archivo .INP deben ser: geometría del modelo, las propiedades, datos del material, condiciones de contorno, cargas y procedimientos requeridos.

Una vez que hemos definido todos los parámetros en el archivo .INP, procedemos a realizar los cálculos mediante la ayuda del Cluster.

Cluster es un superordenador, utilizado en el I3A para las complejas simulaciones que se llevan a cabo en sus investigaciones.

A través de una serie de comandos, Cluster, realizara los cálculos y nos proporcionara un archivo de extensión .ODB, que será el que nos permitirá abrir ABAQUS.

Una vez que tenemos el archivo .ODB, lo abrimos y ABAQUS nos mostrará los resultados de los cálculos realizados. Nos centraremos, como anteriormente hemos dicho, en las tensiones máximas, mínimas y los desplazamientos.

Para poder apreciar mejor las variaciones que sufre el hueso con respecto a las tensiones, jugaremos con los límites de la leyenda. Podremos observar los resultados, solo en los grupos que hemos creado y hemos exportado. Podemos intentar aislar un conjunto de elementos para poder ver los resultados en este grupo, pero conlleva gran dificultad aislarlo de manera precisa.

Una vez que hemos modificado la leyenda, guardamos la imagen obtenida, desde distintos puntos de vista, para poder compararla con las imágenes de los demás casos, para obtener las conclusiones.

6.2.2. SESAMOIDEOS

6.2.2.1. CIRUGÍA

La función principal de los sesamoideos es la de repartir la presión, evitar el rozamiento y ser punto de apoyo. Para corregir la forma de apoyo del pie, que puede generar problemas, se lleva a cabo una extracción de los huesos sesamoideos. Los huesos sesamoideos son dos, sesamoideo medial y sesamoideo lateral. La cirugía consiste en la extracción del medial, el lateral o de los dos según se considere mejor. En caso de ser los dos sesamoideos los extraídos, se desinsertarán los ligamentos supensorios de los dos sesamoideos y los ligamentos intersesamoidal. En el caso de que solo sea uno de los sesamoideos el extraído, se desinsertarán los ligamentos intersesamoidales y el ligamento suspensorio que le corresponda.

6.2.2.2. I-DEAS

Hemos creado varios grupos, un grupo con los dos sesamoideos, otros dos, uno para cada sesamoideo, otros dos para los ligamentos suspensorios de cada sesamoideo y otro para los ligamentos interesamoidales. Estos grupos, al igual que en el caso del calcáneo, los exportaremos a ABAQUS.

6.2.2.3. ABAQUS

En este caso, tendremos tres simulaciones distintas, extracción de los dos sesamoideos, extracción del sesamoideo medial o extracción del sesamoideo lateral. Por lo tanto, en el archivo .INP tendremos que hacer tres modificaciones distintas según sea el caso. Si la extracción es de los dos sesamoideos, los grupos que le pediremos a ABAQUS que no los muestre, serán el conformado por los sesamoideos, los ligamentos interesamoidales, y los ligamentos suspensorios. En el caso de tratarse del sesamoideo medial, removeremos el grupo de elementos formado por este hueso, los ligamentos suspensorios del sesamoideo medial y los ligamentos interesamoidales. En el caso de extracción del sesamoideo lateral, realizaremos el mismo proceso que el anterior, los ligamentos suspensorios serán los del lateral.

Después de las modificaciones pertinentes para cada simulación, con ayuda del Cluster, haremos los cálculos y obtendremos tres archivos de extensión .ODB diferentes.

En este caso nos interesa saber cómo influye la ausencia de los sesamoideos a los demás metatarsianos y los desplazamientos de los mismos, que serán más evidentes que en el caso del calcáneo.

6.2.3. PROPIEDADES DE LOS TEJIDOS

Antes de definir las propiedades de los tejidos del pie que vamos a necesitar para el estudio, conoceremos un poco la fisiología de estos para poder comprender sus propiedades mecánicas.

Las propiedades que nos interesan son el módulo de Young o módulo elástico y el coeficiente de Poisson. Los valores de estas propiedades las introduciremos en el archivo .INP y se las asignaremos a cada uno de los tejidos que intervengan en los cálculos.

6.2.3.1. HUESOS

El tejido óseo es uno de los más rígidos y resistentes del cuerpo. Da protección y soporte a las partes blandas y órganos vitales. Ejerce de palanca para transformar las contracciones del sistema muscular en movimientos útiles.

El tejido óseo se clasifica en dos tipos: compacto o cortical y esponjoso. El tejido cortical, una capa compacta y densa, es la capa más externa del hueso. El tejido esponjoso recibe ese nombre, debido al aspecto de esponja que posee. Se encuentra en el interior del hueso donde forma un reticulado continuo que se encuentra ocupado por la médula ósea y los vasos sanguíneos.

Así las propiedades mecánicas de los tejidos cortical y esponjoso son las siguientes:



Figura 20: malla tejido cortical.

TEJIDO CORTICAL

- Módulo de Young 17.000 MPa
- Coeficiente de Poisson 0.3
- Material isótropo elástico-lineal.

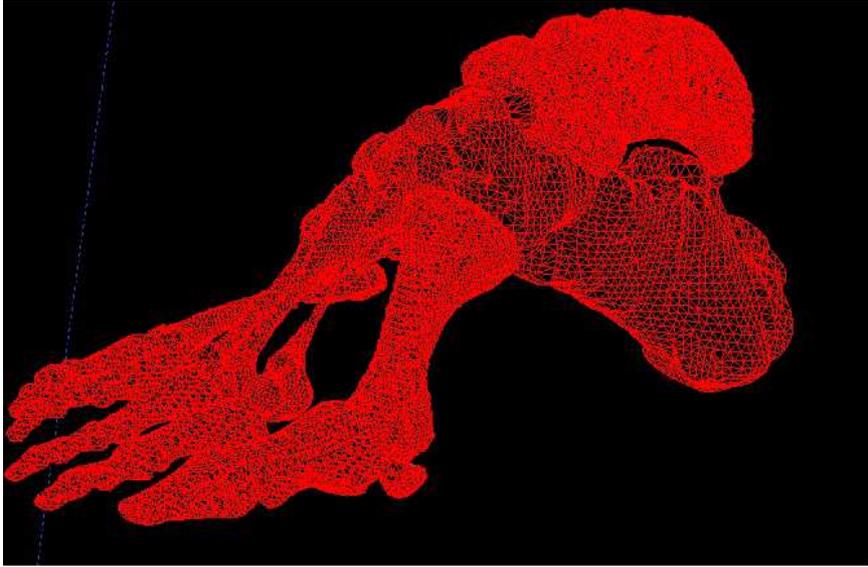


Figura 21: malla tejido esponjoso.

TEJIDO ESPONJOSO

- Módulo de Young 700MPa
- Coeficiente de Poisson 0.3
- Material isótropo elástico-lineal

6.2.3.2. LIGAMENTOS

Los ligamentos están formados por fibras resistentes de naturaleza similar a la de los tendones. Su principal función es la de la unión y de dar estabilidad a estructuras anatómicas, especialmente a las articulaciones. Se encargan de permitir movimientos dentro de las direcciones naturales e impide movimientos anatómicamente anormales.

En nuestro modelo podemos encontrar varios tipos de ligamentos, que tendrán propiedades distintas aunque su función sea la misma.

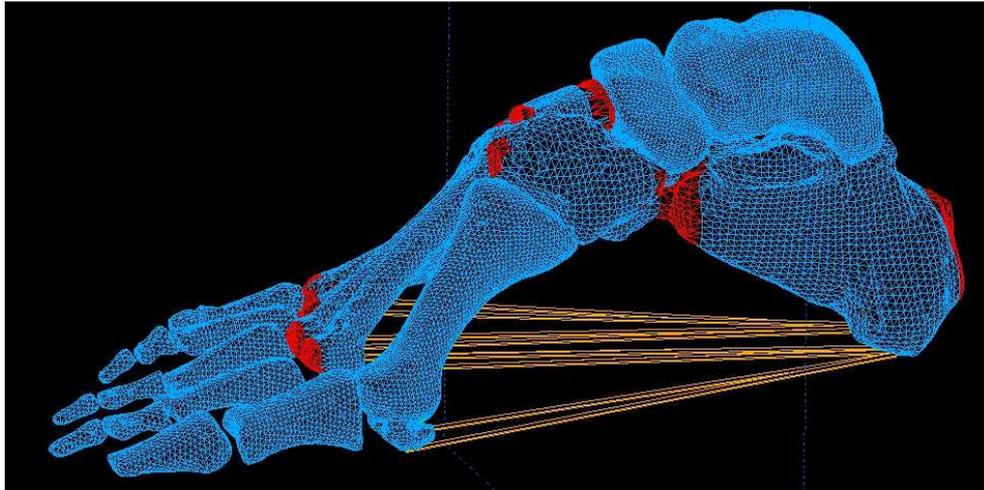


Figura 22: ligamentos de la fascia del pie en color naranja.

LIGAMENTOS DE LA FASCIA

- Módulo de Young 350MPa
- Coeficiente de Poisson 0.3
- Material isótropo elástico-lineal
- Sección circular 7.35 mm²

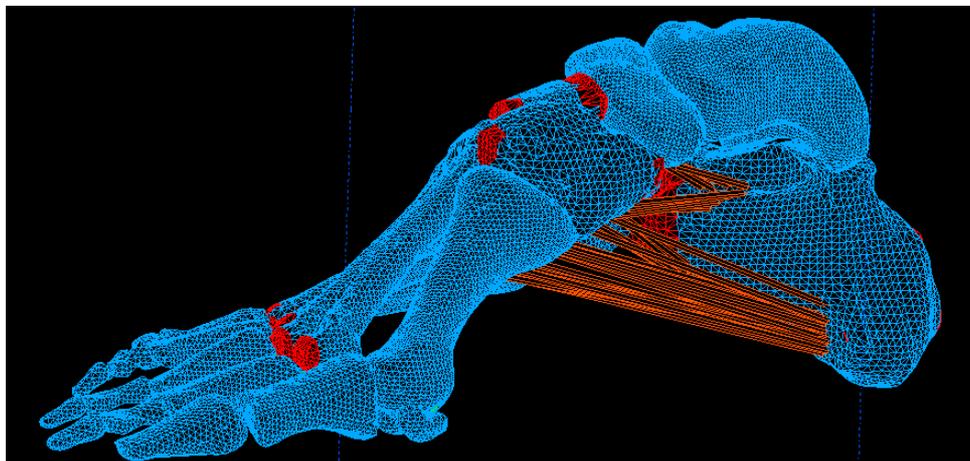


Figura 23: ligamentos superficiales en color naranja.

LIGAMENTOS SUPERFICIALES

- Módulo de Young 350MPa
- Coeficiente de Poisson 0.3
- Material isótropo elástico-lineal
- Sección circular 7.35 mm²

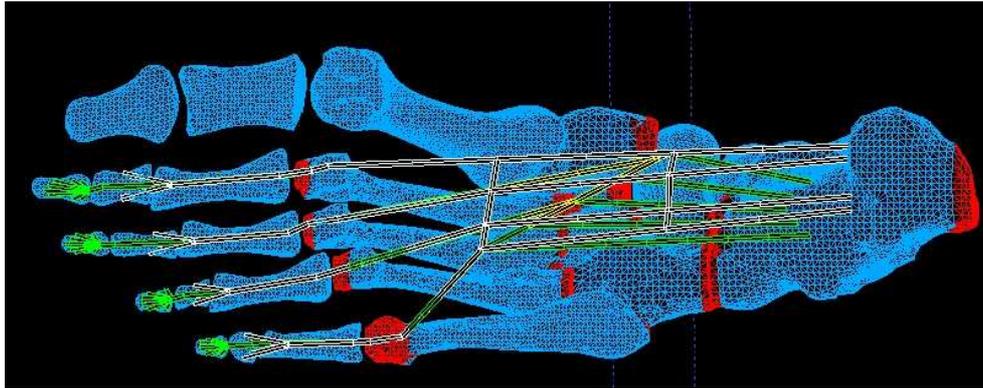


Figura 24: ligamentos flexores en color blanco, verde y amarillo.

LIGAMENTOS FLEXORES

- Módulo de Young 450MPa
- Coeficiente de Poisson 0.3
- Material isótropo elástico-lineal
- Sección circular 12.56 mm²

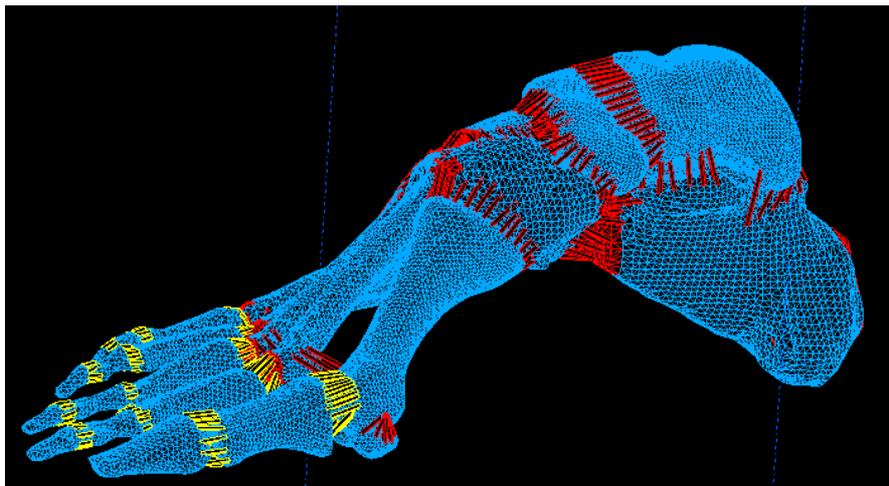


Figura 25: ligamentos finos en color rojo y amarillo.

LIGAMENTOS FINOS

- Módulo de Young 260MPa
- Coeficiente de Poisson 0.3
- Material isótropo elástico-lineal
- Sección circular 0.045mm²

6.2.3.3. CARTILAGOS

El cartílago es un tipo de tejido conjuntivo, elástico y que carece de vasos sanguíneos. Realiza un papel fundamental para el buen funcionamiento de las articulaciones. Es una zona de contacto y de fricción.

Una de sus principales características es el coeficiente de fricción, especialmente bajo con respecto a otros materiales. Este tejido tiene que soportar grandes fuerzas de forma constante y durante mucho tiempo. La superficie se protege con una capa lubricante adherida al cartílago.

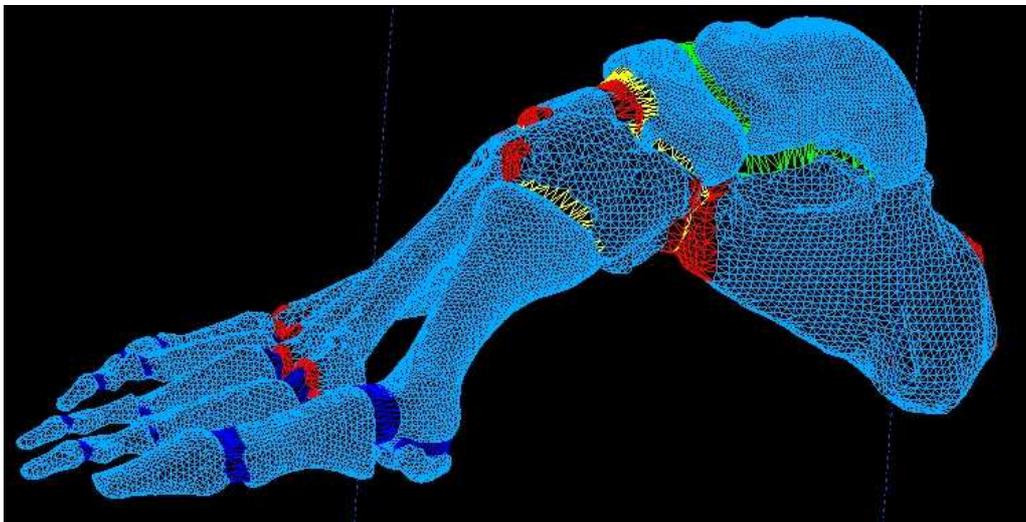


Figura 26: cartílagos en color azul, amarillo y verde.

CARTILAGOS

- Módulo de Young 10MPa
- Coeficiente de Poisson 0.3
- Material isótropo elástico-lineal
- Coeficiente de fricción 0.02-0.002

6.2.4. CONDICIONES DE CONTORNO

Para el estudio que vamos a realizar, las condiciones de contorno las definiremos solo para una fase del ciclo de la marcha que será la de apoyo medio, en la que el pie está totalmente apoyado.

La cara inferior del calcáneo, los sesamoideos y las cabezas de los metatarsianos son los puntos de apoyo en el suelo.

Para poder definir las condiciones de contorno, hemos creado dos grupos de nodos en I-DEAS llamados “APOYO_META” y “APOYO_TALON” formado el primero por 18 nodos que se distribuyen entre los sesamoideos y las cabezas de los metatarsianos, y 12 nodos en el segundo que se encuentran en la base del calcáneo. Estos grupos los exportaremos a ABAQUS para poder trabajar con ellos y realizar los cálculos.

Modificamos el archivo .INP definiendo las condiciones de contorno que serán dos. Para el grupo “APOYO_META” restringiremos, únicamente, el desplazamiento en el eje perpendicular al suelo. Para el grupo “APOYO_TALON” restringiremos el movimiento en los tres ejes de coordenadas.

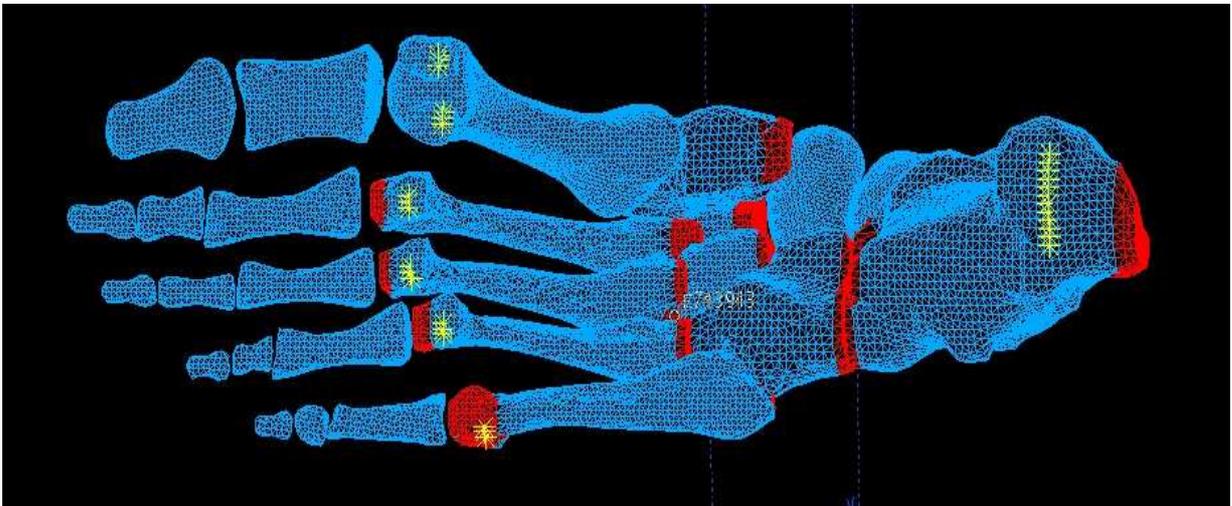


Figura 27: nodos donde se realiza el apoyo en color amarillo.

6.2.5. CARGAS APLICADAS

Al igual que en las condiciones de contorno, hemos creado dos grupos, “NODOSCARGASUPERIOR” y “CARGA_TALON_AQUILES”, en los que aplicaremos las cargas que sufre el pie durante la fase de apoyo medio.

Durante la fase de apoyo medio el pie soporta dos cargas de diferente magnitud y sentido. La mayor carga la soporta el astrágalo con una magnitud de 300N en dirección hacia el suelo con una inclinación de 10°. El grupo “NODOSCARGASUPERIOR” está compuesto de 737 nodos, por lo que la carga se repartirá entre estos.

La otra carga es de una magnitud de 150N y se sitúa sobre el calcáneo en el punto de inserción del tendón de Aquiles, y es equivalente a la fuerza que ejerce este sobre el calcáneo. El sentido en el que se ejerce la carga es contrario al que se ejerce sobre el astrágalo y también tiene una inclinación de 10° . El grupo "CARGA_TALON_AQUILES" es el conjunto de nodos sobre los que recaerá esta carga. Está formado por 9 nodos, que al igual que en el caso anterior, serán sobre los que se reparta la carga.

En el archivo .INP indicaremos el grupo donde se ejerce la carga, y descompondremos la resultante, indicando en que eje se ejerce y el valor de su componente en ese eje.

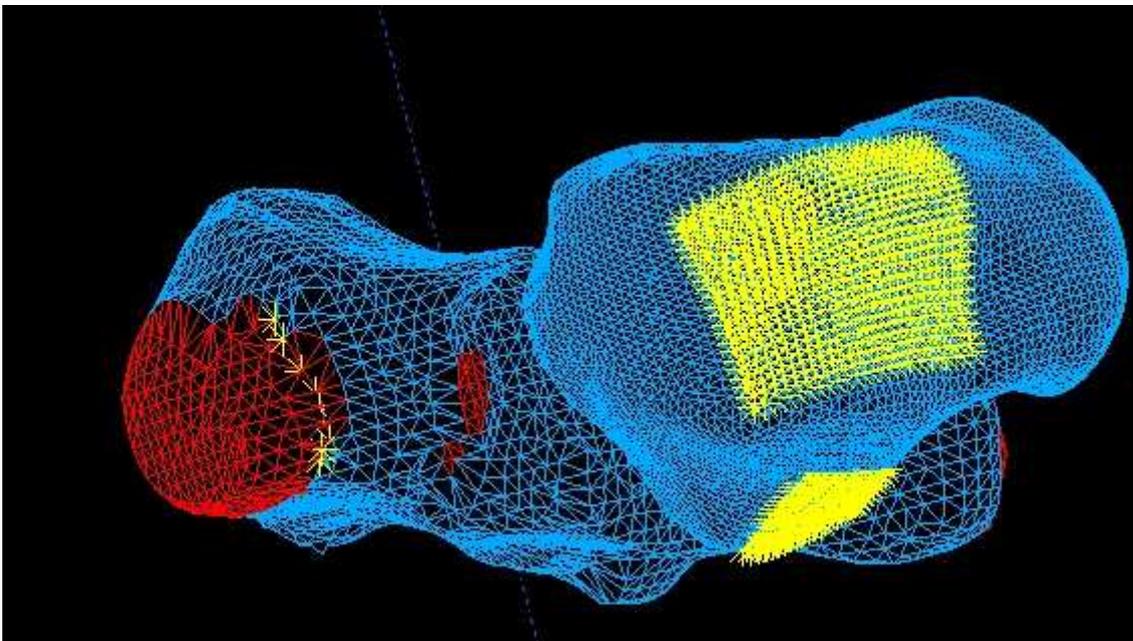


Figura 28: nodos de color amarillo donde se aplican las cargas en el astrágalo y el calcáneo.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

7.1.RESULTADOS DEL CASO DEL ESPOLÓN

Vamos a analizar los tres resultados que nos ha proporcionado ABAQUS: tensiones máximas, mínimas y los desplazamientos.

Dentro del estudio de las tensiones, compararemos entre el hueso sano y el caso del espolón, las tensiones máximas o mínimas, las distribuciones de las tensiones en el hueso y la variación de las tensiones en la región cercana a la extracción.

7.1.1. TENSIONES MÁXIMAS

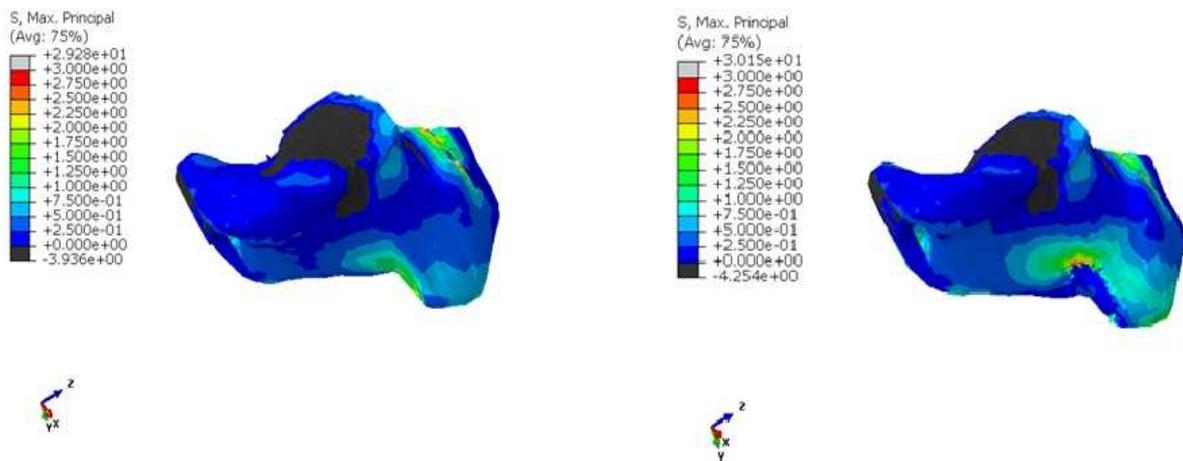


Figura 29: vista medial de las tensiones máximas del calcáneo. A la izquierda caso sano. A la derecha caso del espolón

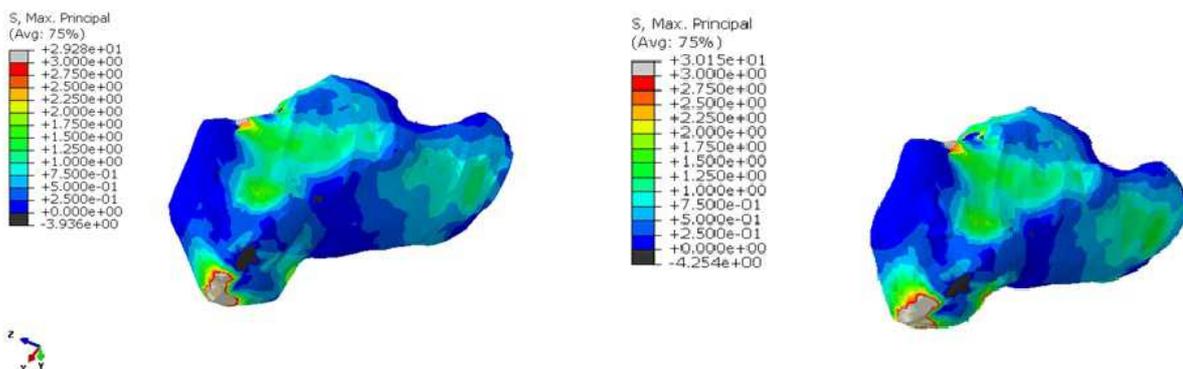


Figura 30: vista lateral de las tensiones máximas del calcáneo. A la izquierda caso sano. A la derecha caso del espolón

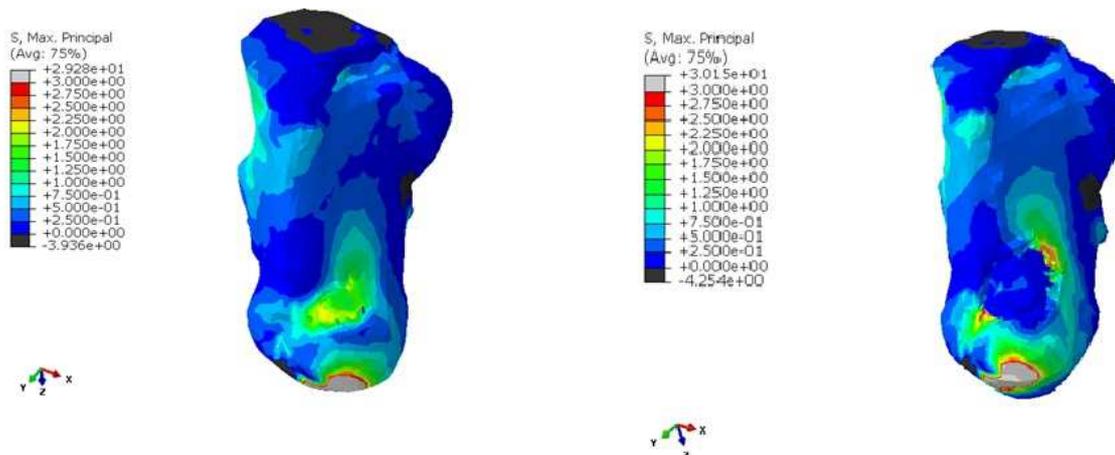


Figura 31: vista inferior de las tensiones máximas del calcáneo. A la izquierda caso sano. A la derecha caso del espolón

Como se puede observar en la leyenda, la tensión máxima apenas varía. Se produce un aumento de la tensión máxima para el caso del espolón, que pasa de 29.28 MPa a 30.15MPa, pero no es muy significativo.

En el mapa de tensiones varia ligeramente, sobre todo en la cara medial y en la inferior. En la cara medial se ve un incremento de las tensiones en la zona por debajo del sustentáculo para el astrágalo, al igual que en la zona posterior. En la cara inferior es más evidente la variación del mapa, que se aprecia en la región anterior de esta cara, donde se ve un aumento tensional.

En la zona circundante a la extracción se aprecia claramente un cambio en el reparto de las tensiones. Al modificarse la morfología del hueso, la zona de extracción se convierte en un concentrador de tensiones. Esta, además, es una zona que concentra tensiones debidas al efecto de la fascia plantar, que ejerce una fuerza de tracción. La fascia plantar es desinsertada del calcáneo durante la cirugía, como hemos dicho anteriormente, para disminuir la tensión que existe en esta, que provoca la fascitis plantar.

Las zonas en las que se observa que existe una mayor tracción son la zona donde se produce el apoyo del calcáneo con el suelo y la zona de alrededor donde se produce la extracción.

7.1.2. TENSIONES MÍNIMAS

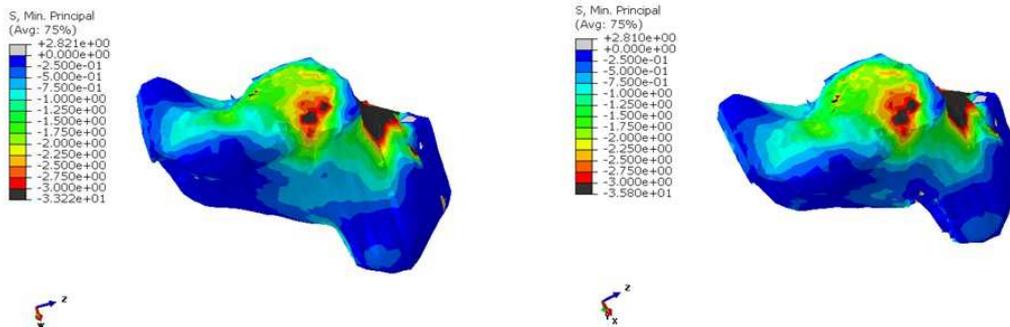


Figura 32: vista medial de las tensiones mínimas del calcáneo. A la izquierda caso sano. A la derecha caso del espolón

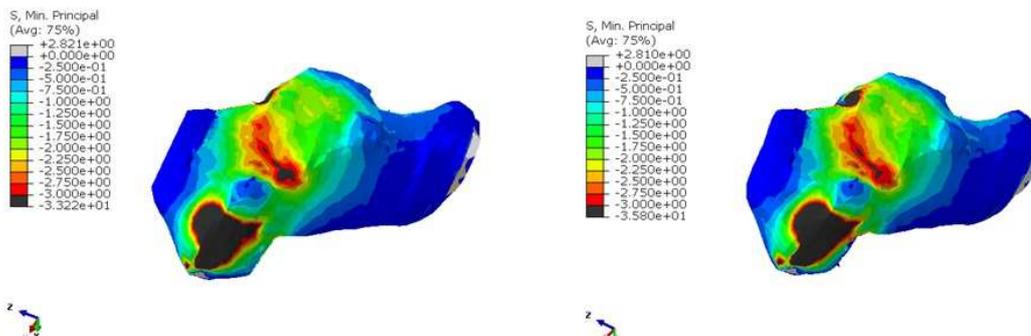


Figura 33: vista lateral de las tensiones mínimas del calcáneo. A la izquierda caso sano. A la derecha caso del espolón

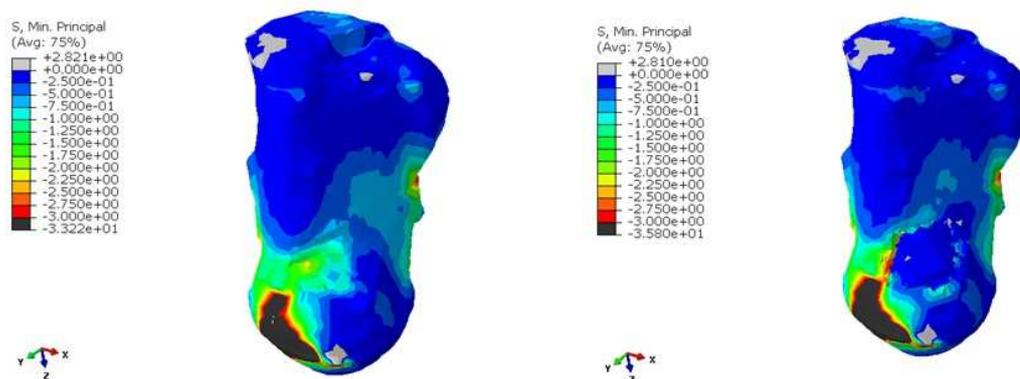


Figura 34: vista inferior de las tensiones mínimas del calcáneo. A la izquierda caso sano. A la derecha caso del espolón

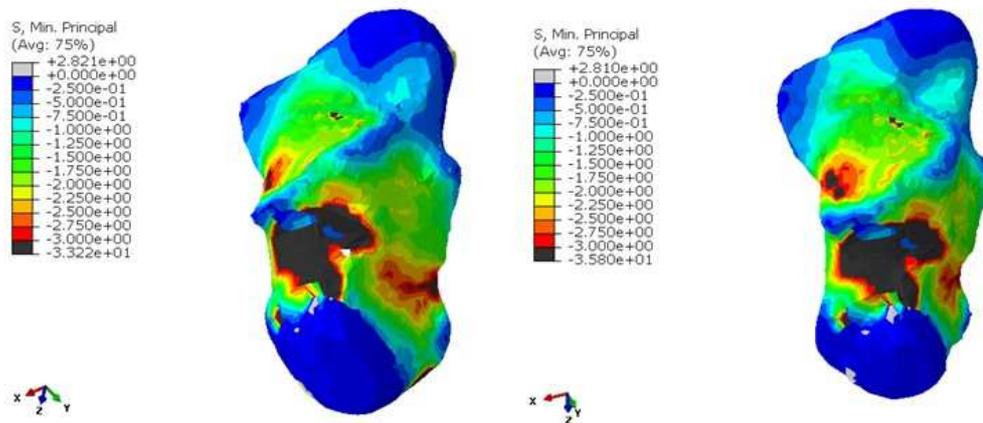


Figura 35: vista superior de las tensiones mínimas del calcáneo. A la izquierda caso sano. A la derecha caso del espón

Los resultados de las tensiones mínimas, tampoco muestran que se haya producido un aumento significativo de los mínimos. Se produce una mayor compresión, que pasa de 33.22MPa a 35.80MPa.

En el mapa de tensiones, observamos que en ambos casos, en la cara lateral en su región posterior y en la cara superior, en la región donde articula con el astrágalo, se producen las mayores compresiones. El cambio de la distribución de tensiones es más notorio en las caras inferior y medial. En la cara medial, disminuye la compresión en la región por debajo del sustentáculo para el astrágalo, y en la cara inferior también se produce el mismo.

Las zonas cercanas a la extracción sufren una disminución de la compresión, siendo mayor en la región media de esta cara.

7.1.3. DESPLAZAMIENTOS

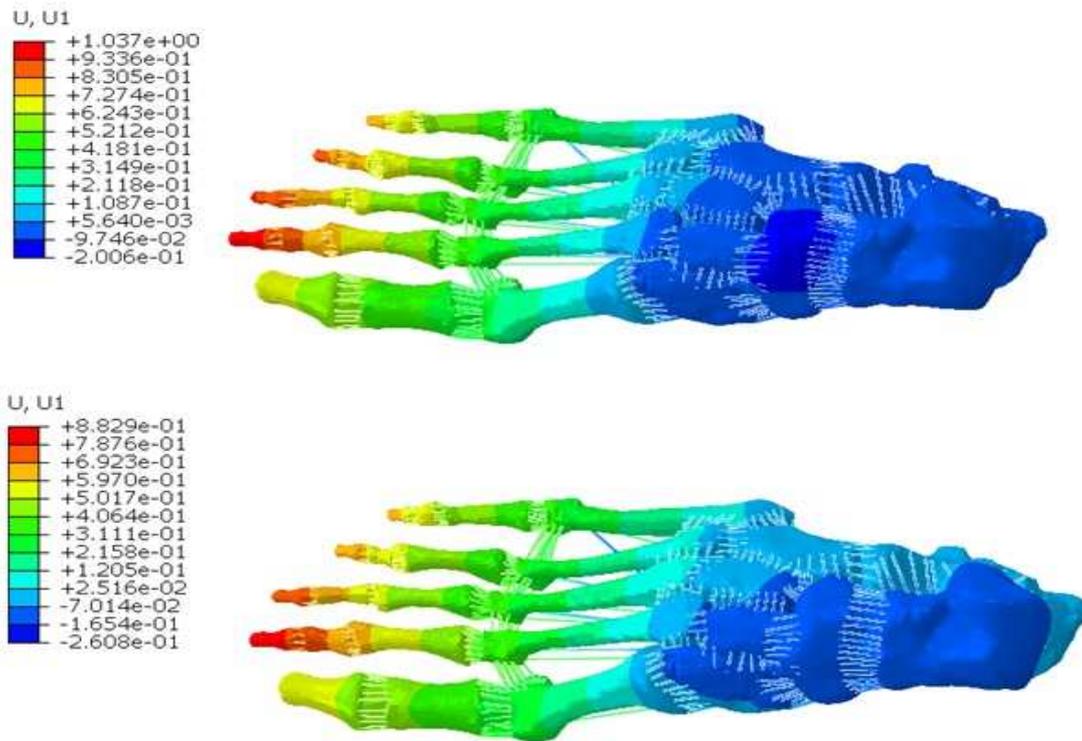


Figura 36: desplazamientos en el eje x. Arriba caso sano. Abajo caso del espolón.

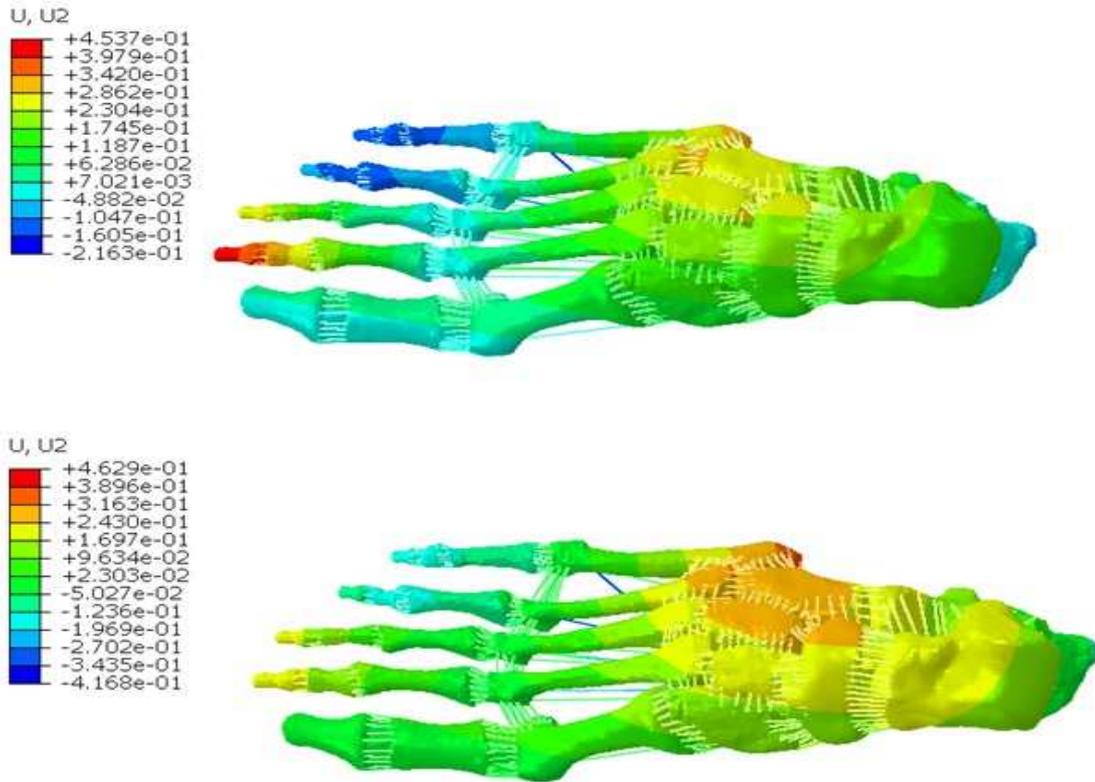


Figura 37: desplazamientos en el eje y. Arriba caso sano. Abajo caso del espolón.

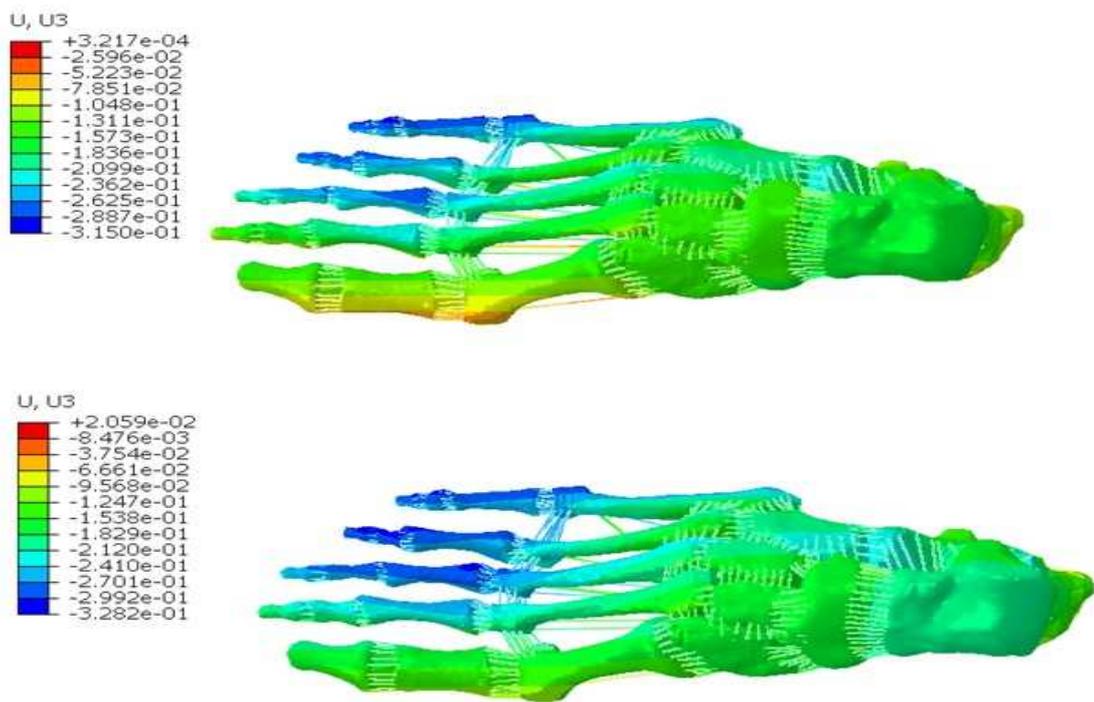


Figura 38: desplazamientos en el eje z. Arriba caso sano. Abajo caso del espolón.

En el caso de los desplazamientos en el eje x o mediolateral se produce una disminución del máximo, mientras que el desplazamiento en el eje z o anteroposterior es prácticamente el mismo.

	ML	AP
Caso sano	1.037mm	0.315mm
Caso espolón	0.8829mm	0.3282mm

Tabla 1: desplazamientos en el eje anteroposterior y mediolateral.

7.1.4. RESUMEN

En el análisis de tensiones hemos encontrado ciertas similitudes en las regiones que presentan mayores esfuerzos y en las caras en las que se produce una mayor variación de la distribución de esfuerzos, siendo la cara medial y la cara inferior para los dos casos.

Los máximos y mínimos han sufrido cambios pero no han sido muy elevados.

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

Tanto en el análisis de la tensión máxima como mínima, se ha apreciado una variación en el mapa de tensiones de la zona cercana a donde se produce la extracción

MPa	TRACCIÓN	COMPRESIÓN
CASO SANO	29.28	33.22
CASO ESPOLÓN	30.15	35.8

Tabla 2: Tracción y compresión máximas.

7.2.RESULTADOS DEL CASO DE LOS SESAMOIDEOS

En el caso de la extracción de los sesamoideos vamos a analizar tres posibles variantes: la extracción del sesamoideo medial, lateral o de los dos.

7.2.1. EXTRACCIÓN DEL SESAMOIDEO MEDIAL

7.2.1.1. TENSIONES MÁXIMAS

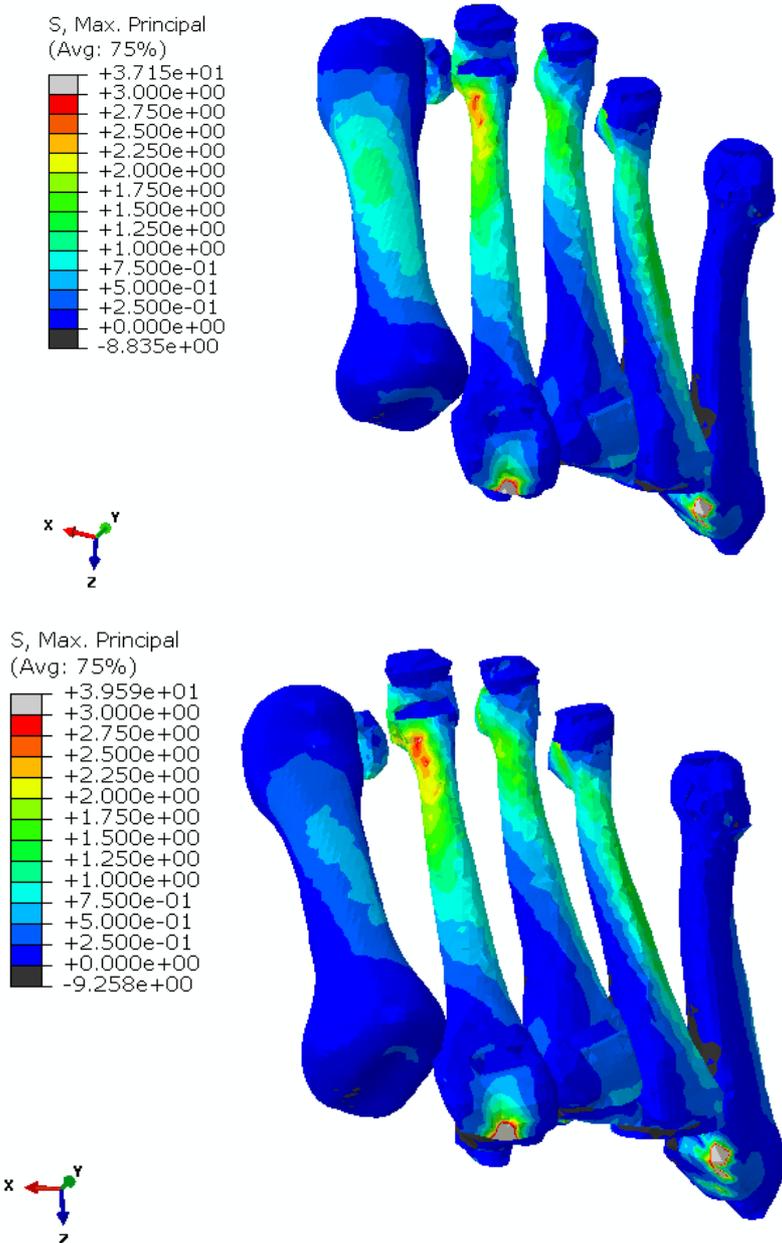


Figura 39: vista superior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo medial.

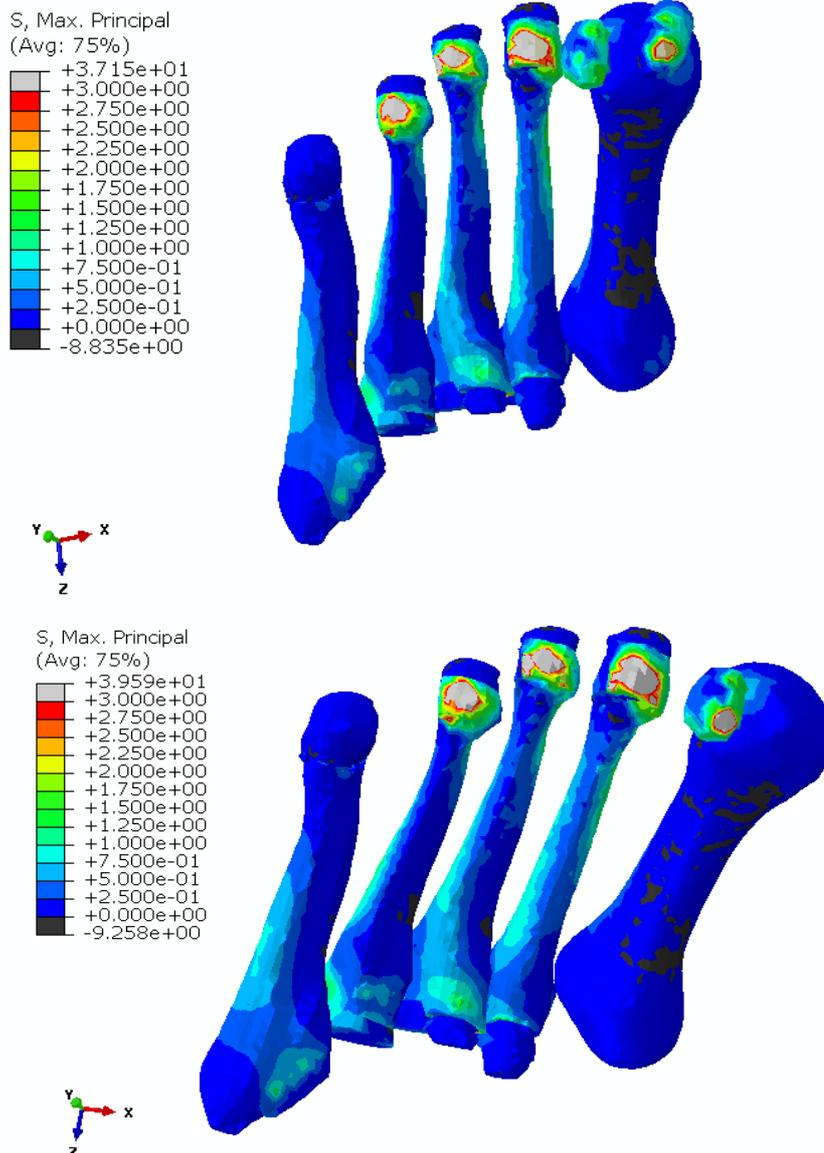


Figura 40: vista inferior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo medial.

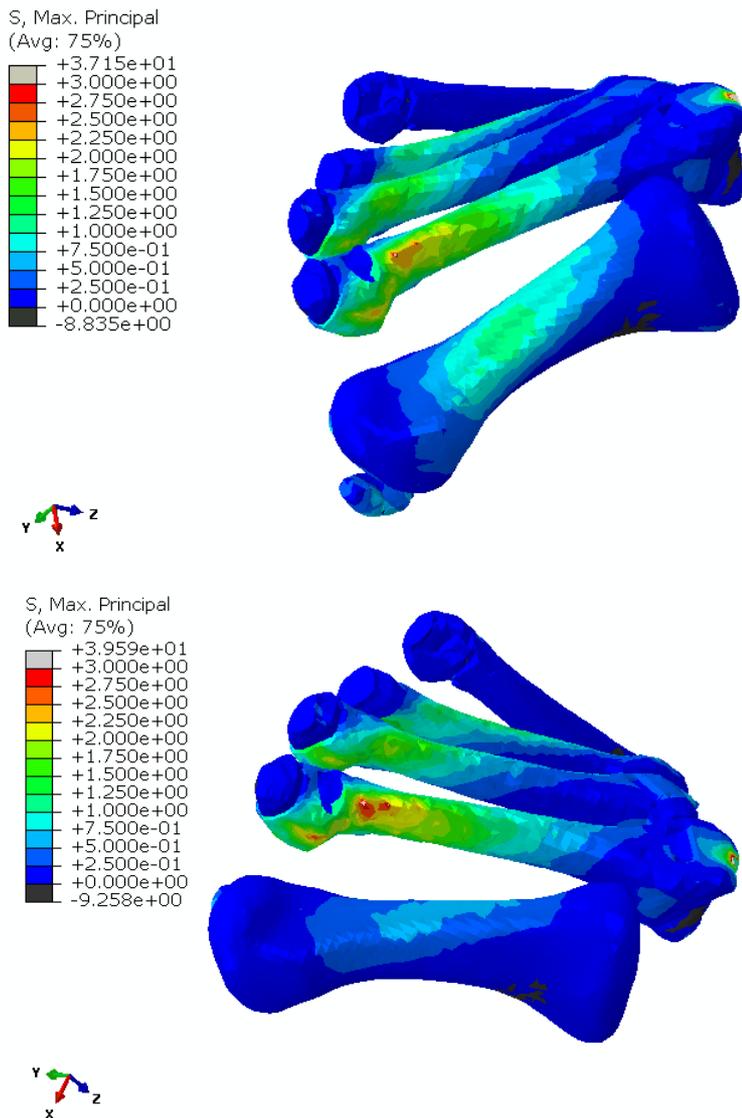


Figura 41: vista medial de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo medial.

En el caso de la extracción del sesamoideo medial, se puede apreciar que la tensión máxima soportada, apenas ha variado, pasa de 37.15MPa a 39.59Mpa. Observamos también que el primer metatarsiano sufre un notable cambio en su mapa de tensiones soportando una menor tracción que en el caso sano.

Si nos fijamos en el segundo metatarsiano observamos que existe un aumento de la tracción conforme nos acercamos al extremo distal. Se produce una ligera variación en la distribución de las tensiones en este hueso, no tan notoria con en el primer metatarsiano.

En los demás metatarsianos, apenas se aprecia cambios en el mapa de tensiones.

7.2.1.2. TENSIONES MÍNIMAS

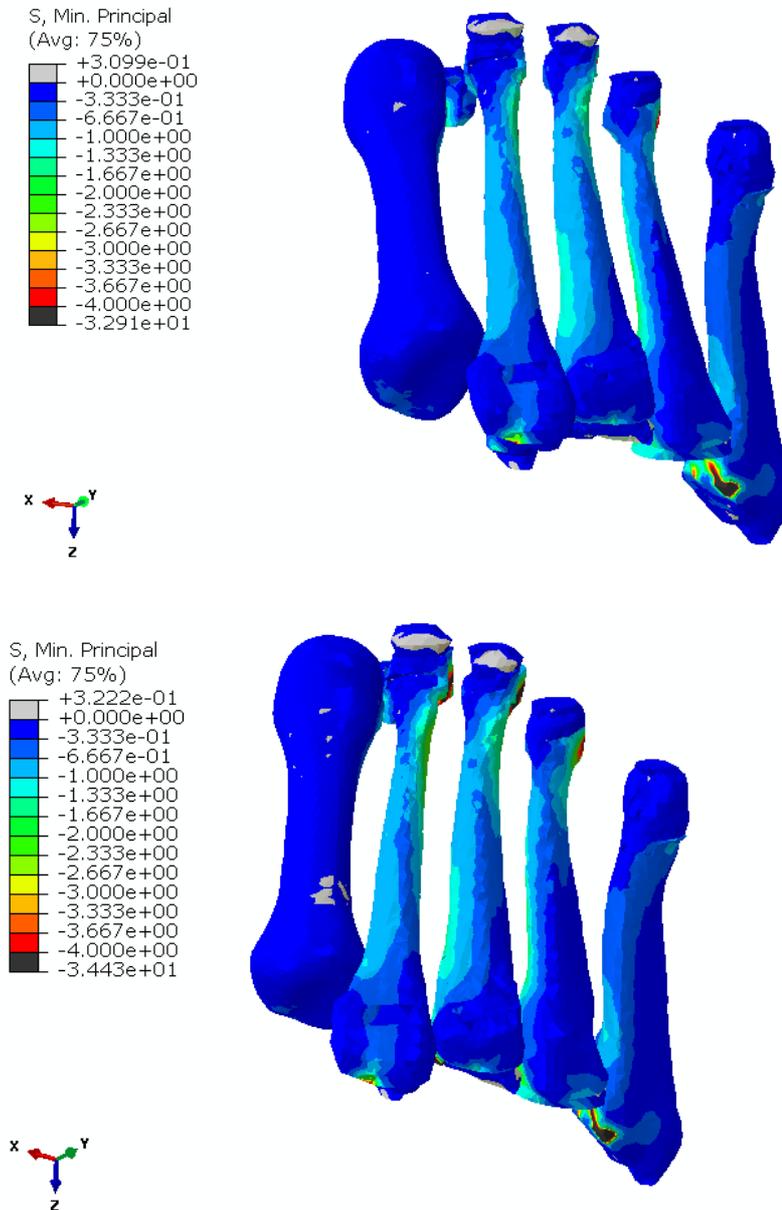


Figura 42: vista superior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo medial.

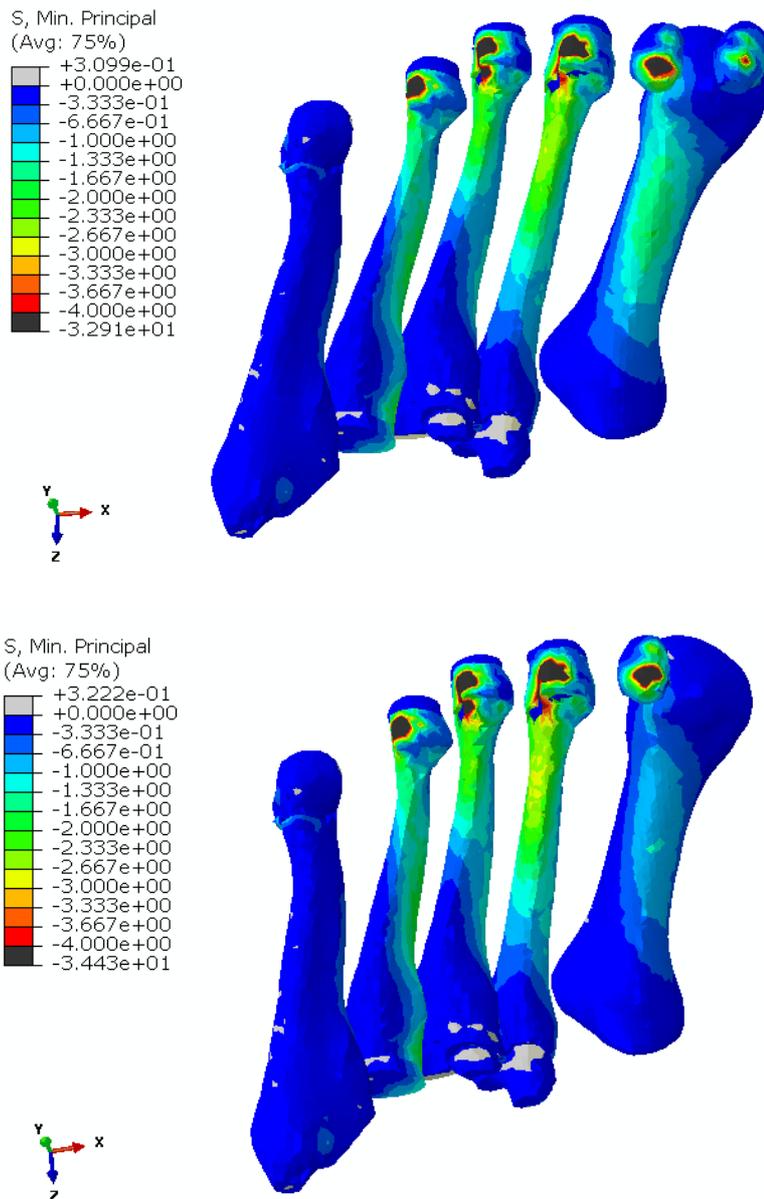


Figura 43: vista inferior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo medial,

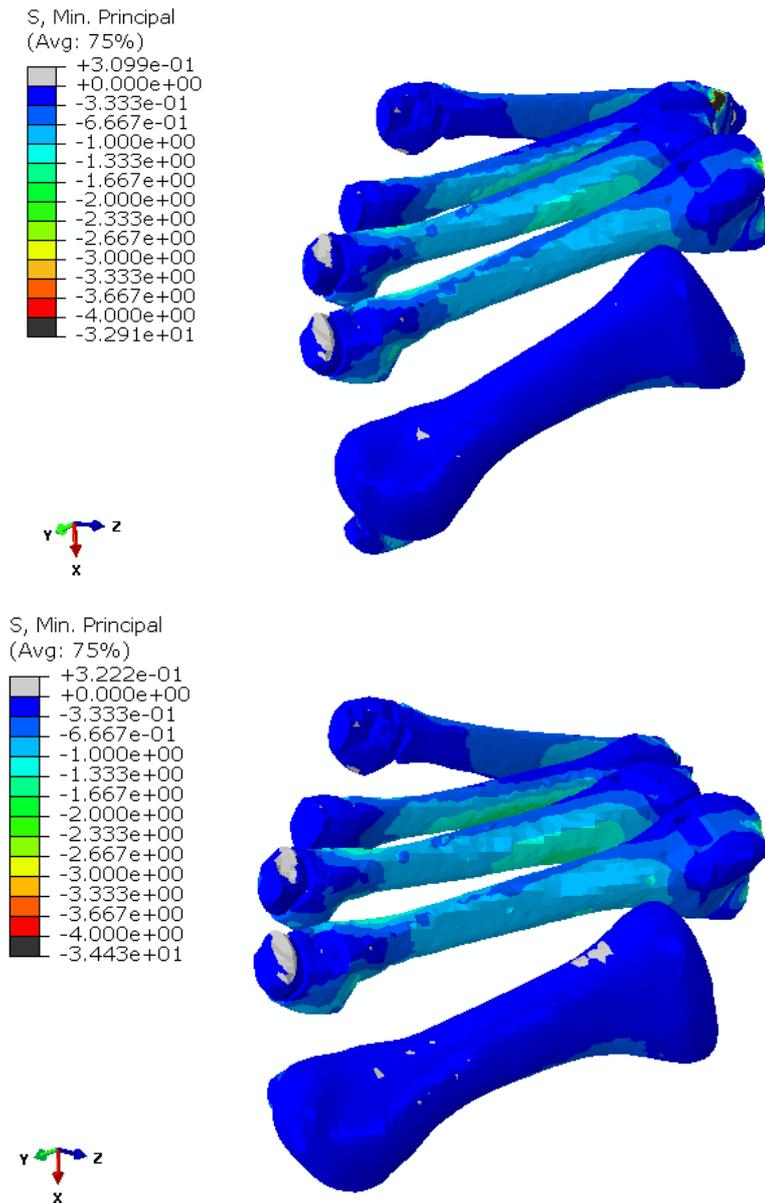


Figura 44: vista medial de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo medial.

En el análisis de las tensiones mínimas, al igual que en el análisis de las tensiones máximas, es el primer metatarsiano el que tiene variaciones más evidentes. En la zona del hueso que se encuentra en la región plantar del pie, se produce una reducción de la compresión que soporta.

El mapa de tensiones se ve alterado de manera muy ligera en el segundo metatarsiano.

La compresión máxima varía ligeramente también de 32.91Mpa a 34.43Mpa.

7.2.2. EXTRACCIÓN DEL SESAMOIDEO LATERAL

7.2.2.1. TENSIONES MÁXIMAS

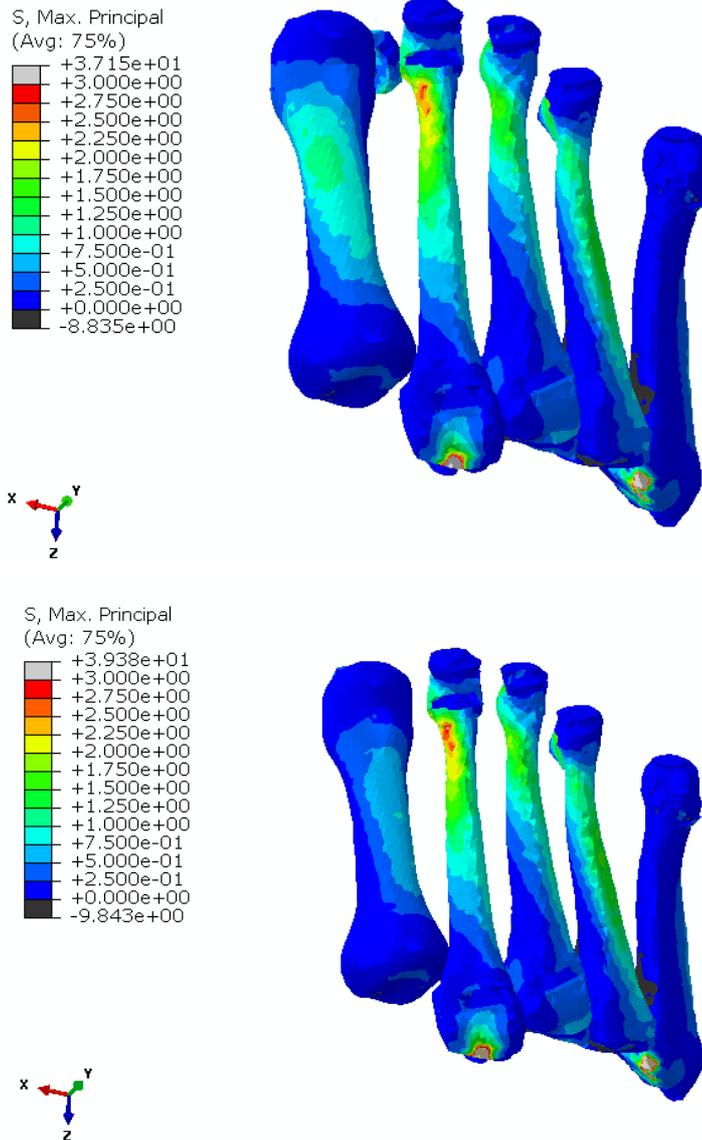


Figura 45: vista superior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo lateral.

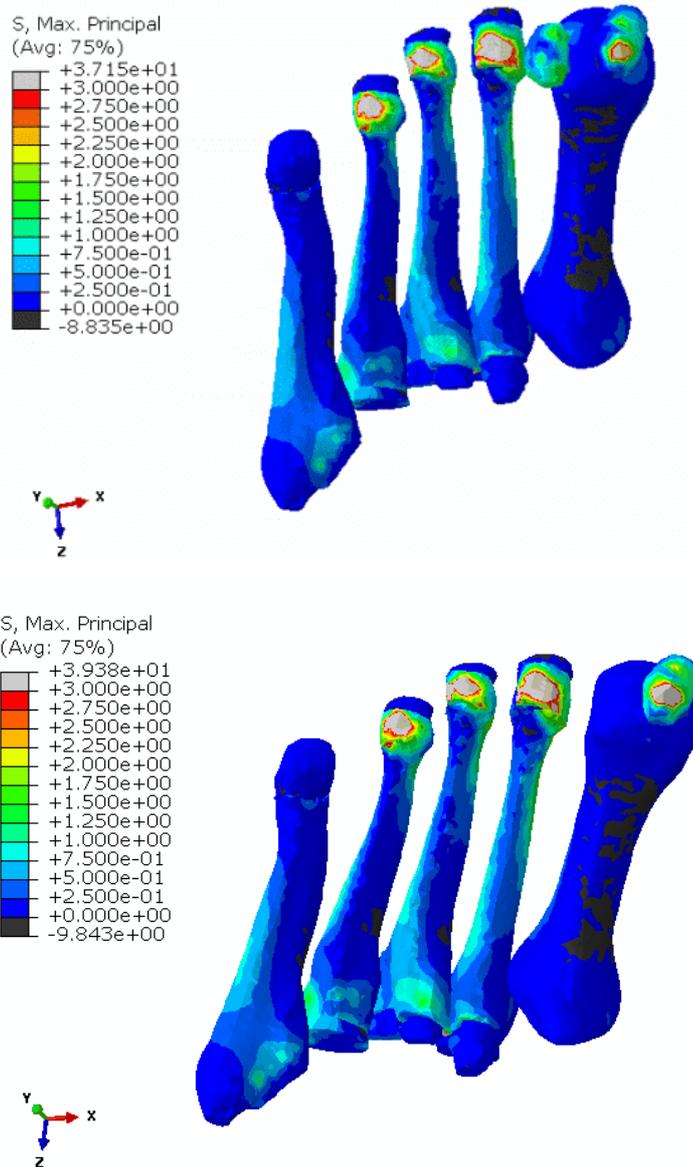


Figura 46: vista inferior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo lateral.

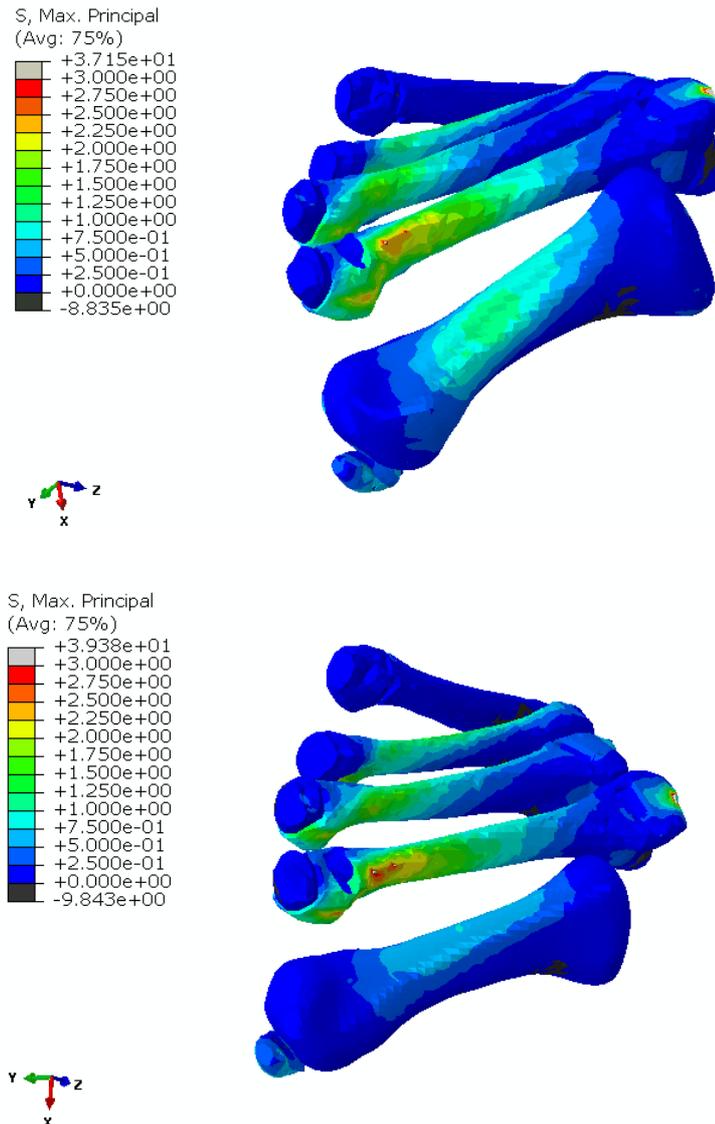


Figura 47: vista medial de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo lateral.

En el caso de la extracción del sesamoideo lateral los resultados obtenidos, en el caso de las tensiones máximas, son muy similares a los del caso de extracción del sesamoideo medial. El máximo en este caso es de 39.38MPa siendo de 39.59 MPa en el caso del medial.

El primer metatarsiano se ve afectado de la misma manera, produciéndose una disminución de la tracción en la región central del hueso.

El segundo metatarsiano sufre un aumento de la tracción en el extremo distal.

7.2.2.2. TENSIONES MÍNIMAS

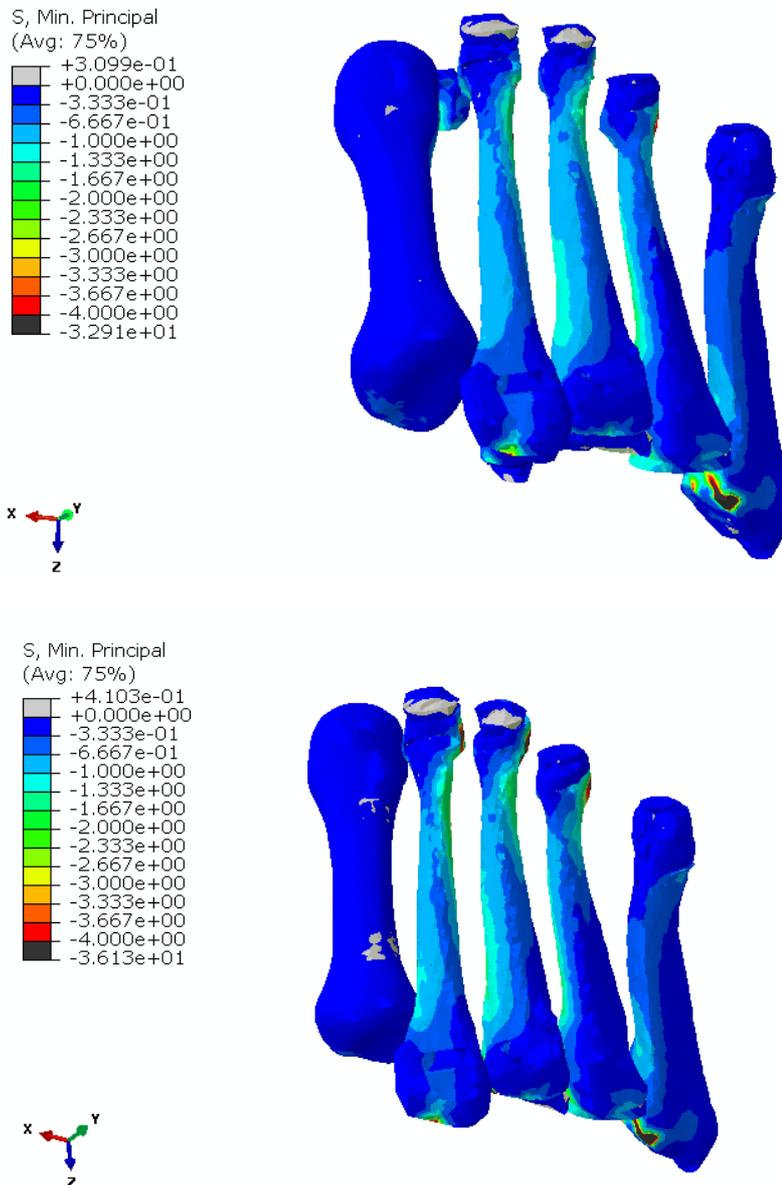


Figura 48: vista superior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo lateral.

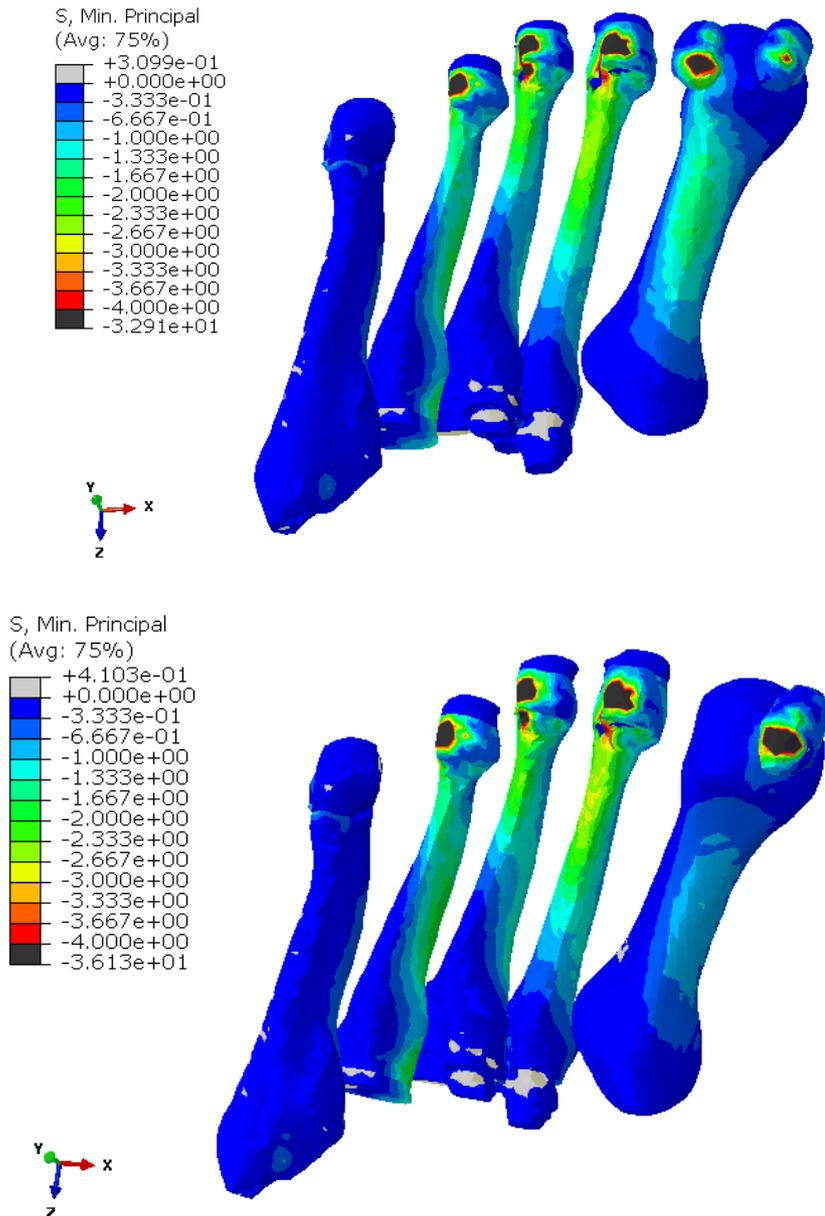


Figura 49: vista inferior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo lateral.

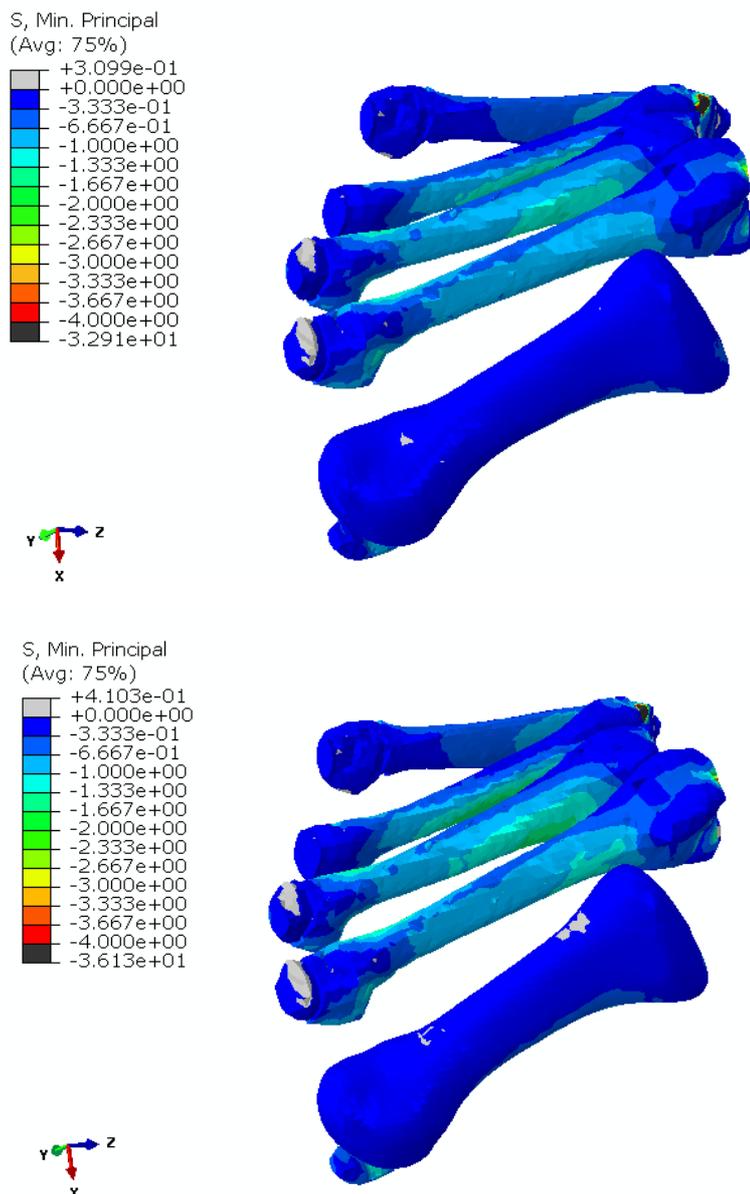


Figura 50: vista medial de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción del sesamoideo lateral.

La compresión máxima varía un poco más que en el caso de la extracción del sesamoideo medial, aunque sigue siendo muy pequeña. Alcanza un máximo de 36.13Mpa para este caso y de 34.43Mpa para el caso del sesamoideo medial.

La región donde se articulaba el sesamoideo lateral, y por lo tanto disminuyendo la compresión en el primer metatarsiano y consecuentemente variando su mapa de tensiones.

El segundo metatarsiano también sufre una pequeña variación en su mapa de tensiones.

7.2.3. EXTRACCIÓN DE LOS DOS SESAMOIDEOS

7.2.3.1. TENSIONES MÁXIMAS

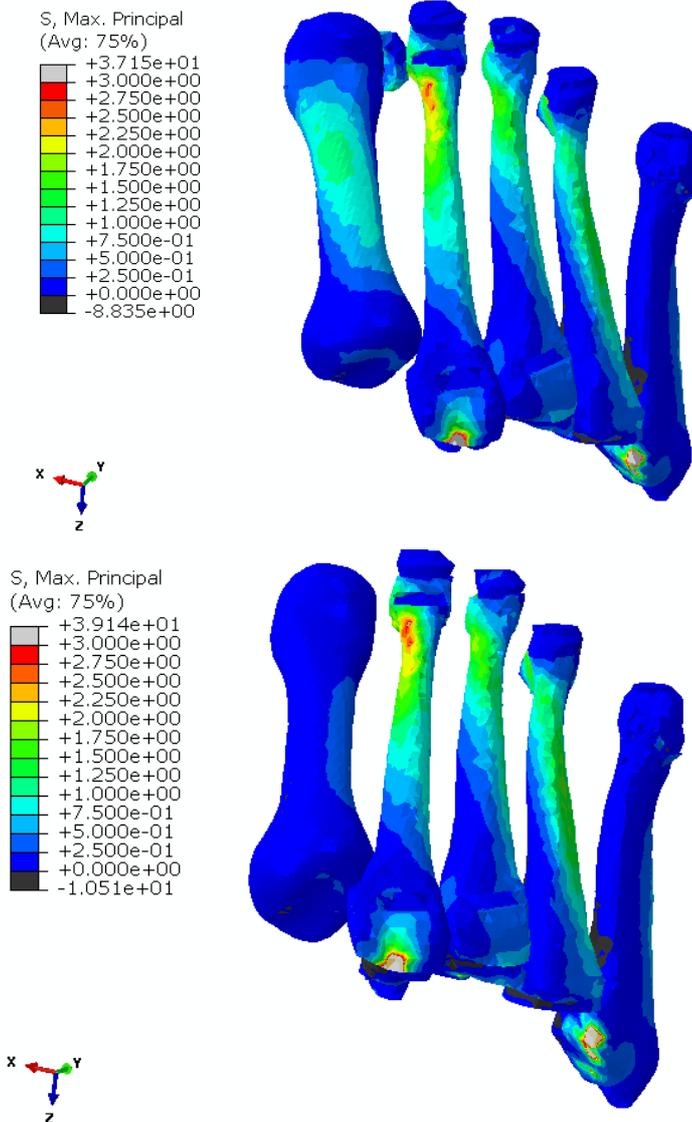


Figura 51: vista superior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción de los dos sesamoideos.

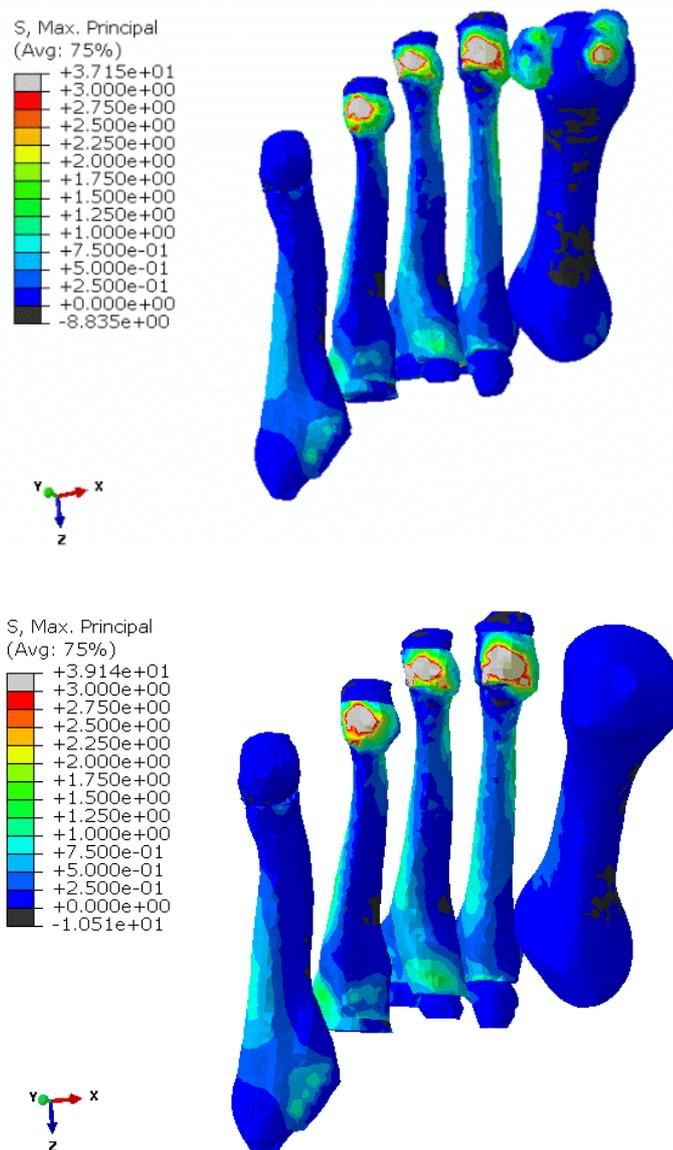


Figura 52: vista inferior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción de los dos sesamoideos.

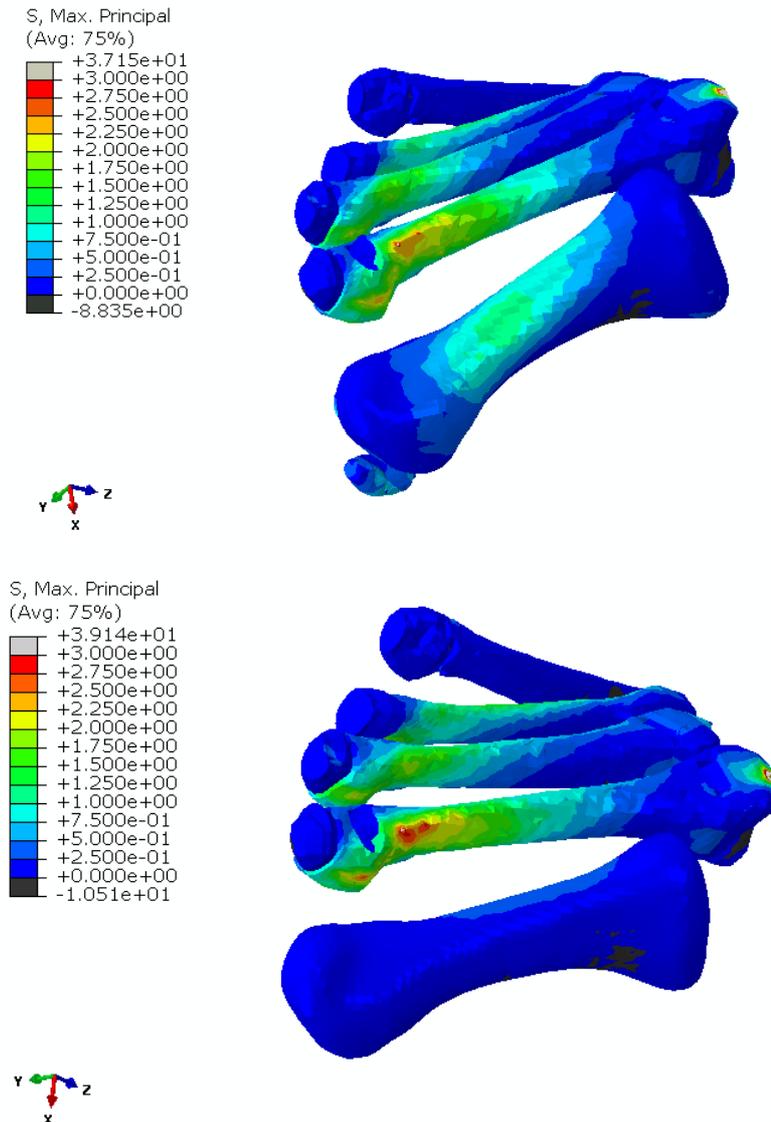


Figura 53: vista medial de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción de los dos sesamoideos.

En el caso de la extracción de los dos sesamoideos, el primer metatarsiano sufre una disminución de la tracción muy evidente, siendo casi nula. La única zona en la que se aprecia algo de tracción es en la cara exterior de este.

La tensión máxima soportada es de 39.14Mpa, un valor muy parecido a todos los casos anteriores, en el análisis de las tensiones máximas.

El mapa de tensiones del segundo metatarsiano, también se ve alterado produciéndose un aumento de la tracción en extremo distal del hueso.

7.2.3.2. TENSIONES MÍNIMAS

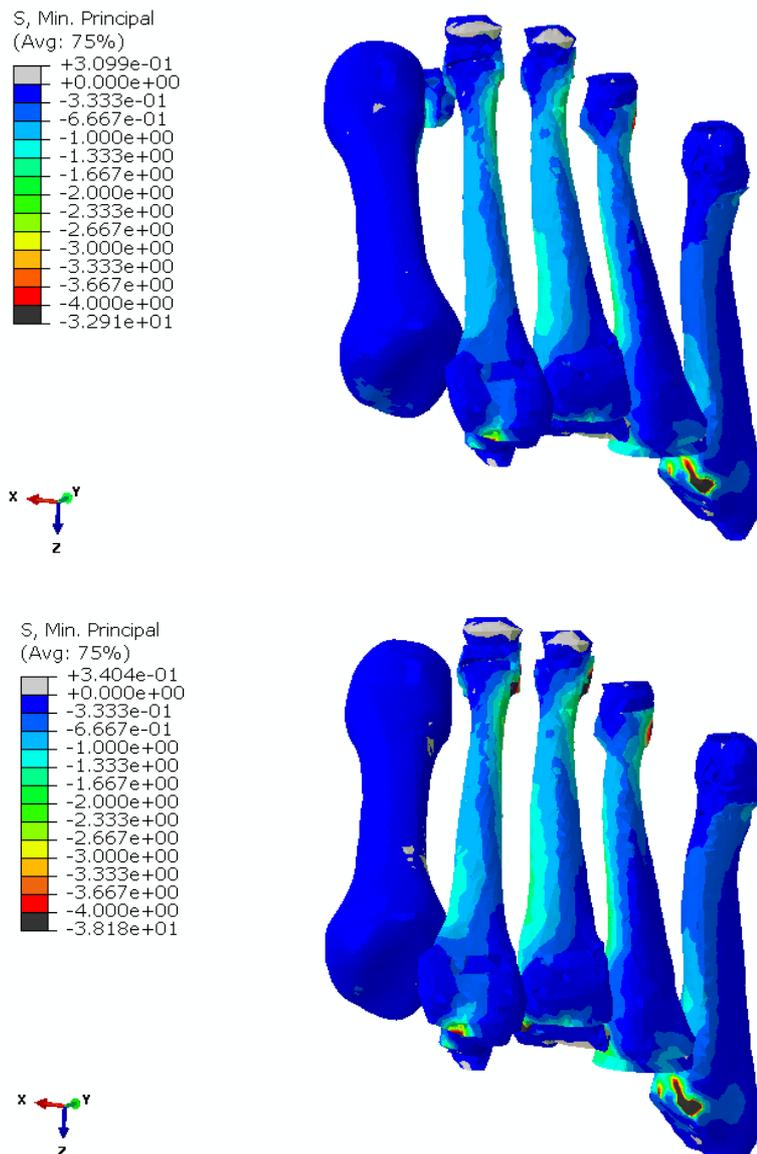


Figura 54: vista superior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción de los dos sesamoideos.

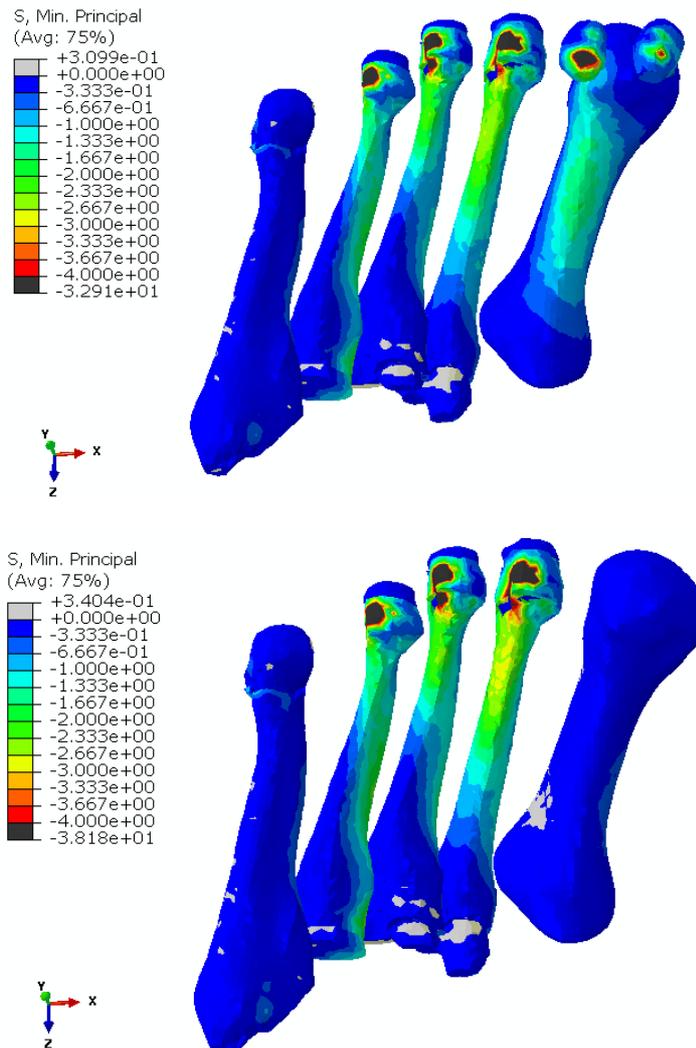


Figura 55: vista inferior de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción de los dos sesamoideos.

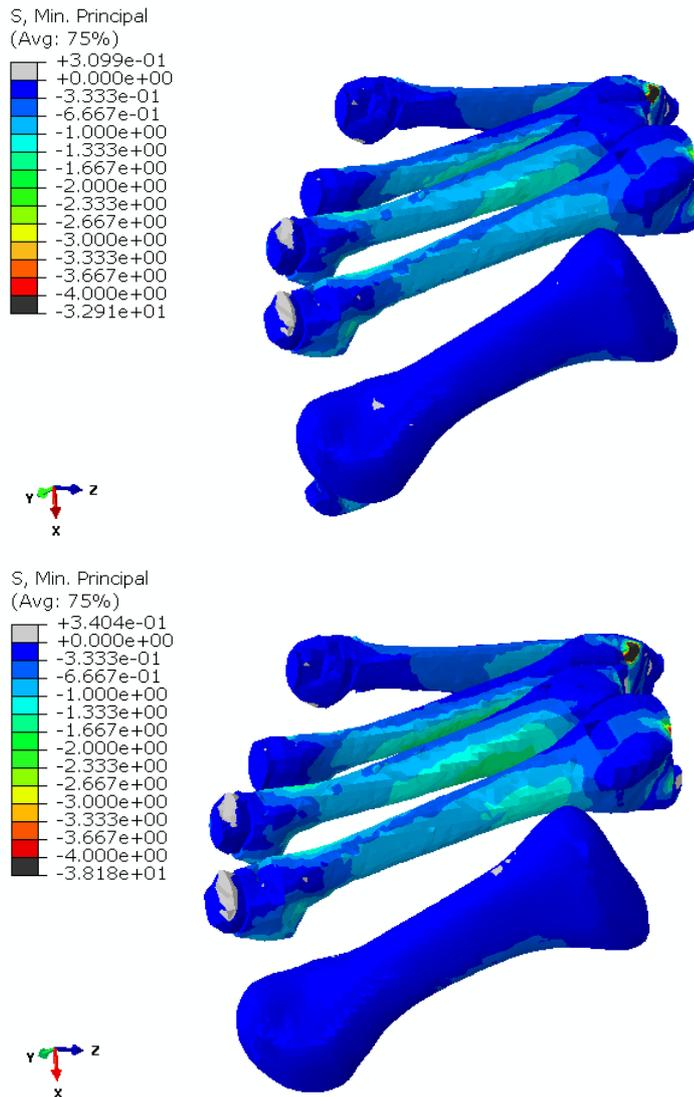


Figura 56: vista medial de los metatarsianos. Arriba el caso sano. Abajo el caso de la extracción de los dos sesamoideos.

Los resultados de las tensiones mínimas, nos muestran que en el primer metatarsiano también se produce una desaparición casi por completo de la compresión.

El mayor aumento de la compresión se produce en este caso, alcanzando un valor de 38.18Mpa.

EL mapa de tensiones del segundo y tercer metatarsiano también se ve alterado produciéndose un ligero aumento de las tensiones que toleran.

7.2.4. DESPLAZAMIENTOS

7.2.4.1. DESPLAZAMIENTOS EN X

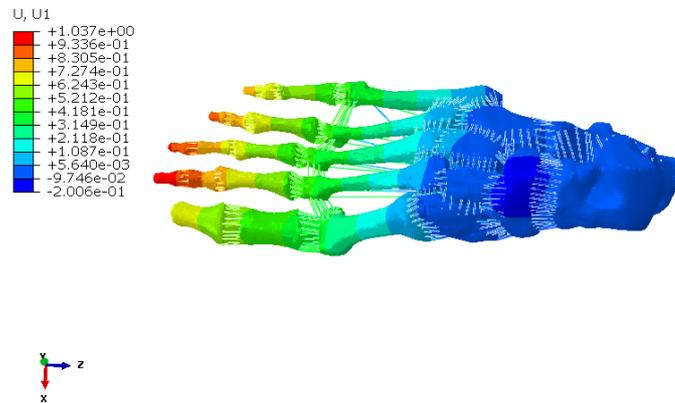


Figura 57: caso sano.

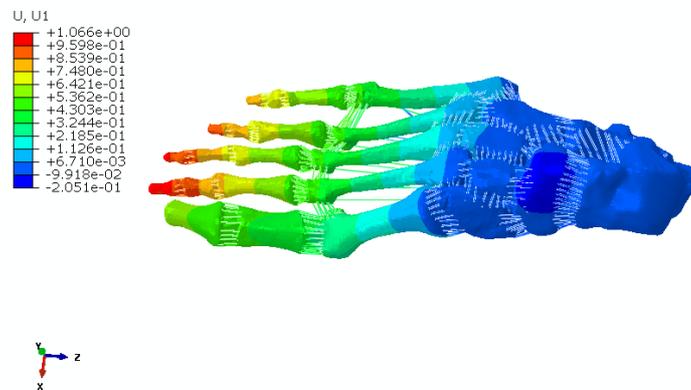


Figura 58: caso de la extracción del sesamoideo medial.

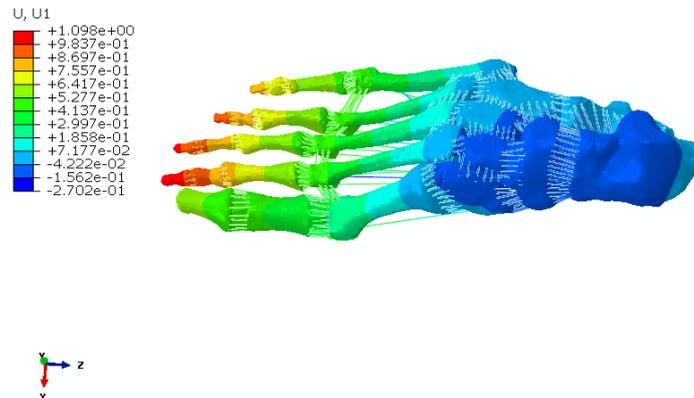


Figura 59: caso de la extracción del sesamoideo lateral.

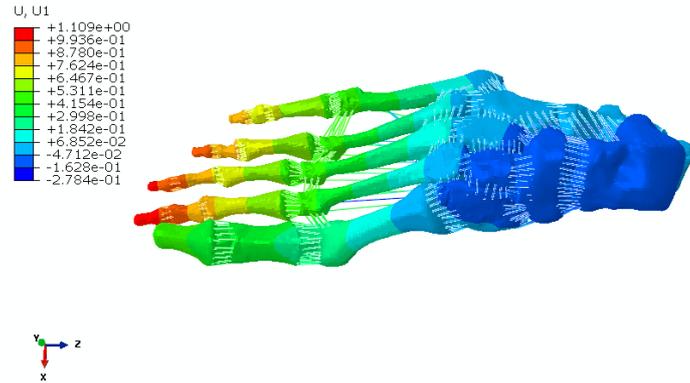


Figura 60: caso de la extracción de los dos sesamoideos.

7.2.4.2. DESPLAZAMIENTOS EN Y



Figura 61: caso sano



Figura 62: caso de la extracción del sesamoideo medial.

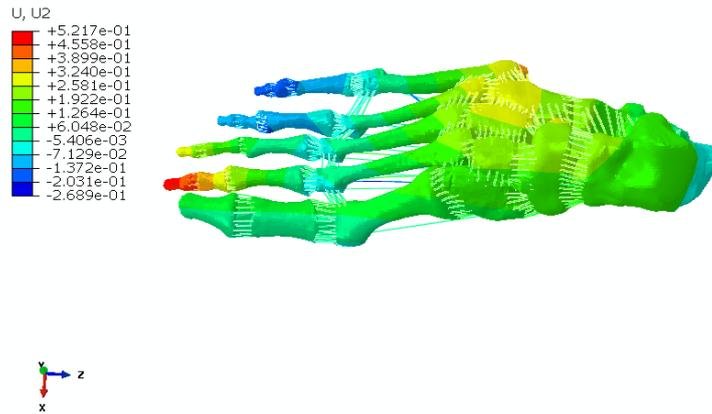


Figura 63: caso de la extracción del sesamoideo lateral.

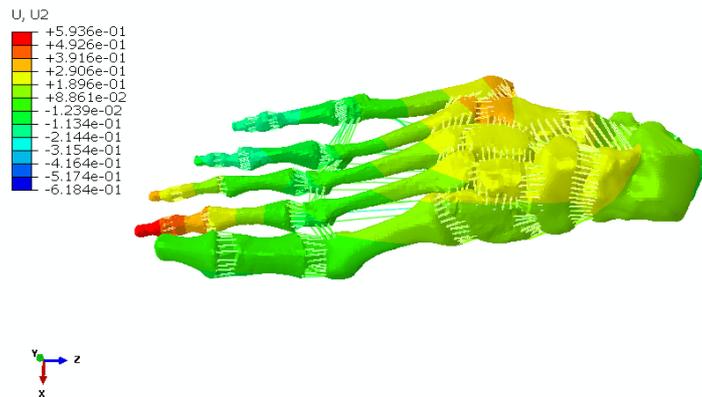


Figura 64: caso extracción de los dos sesamoideos.

7.2.4.3. DESPLAZAMIENTOS EN Z

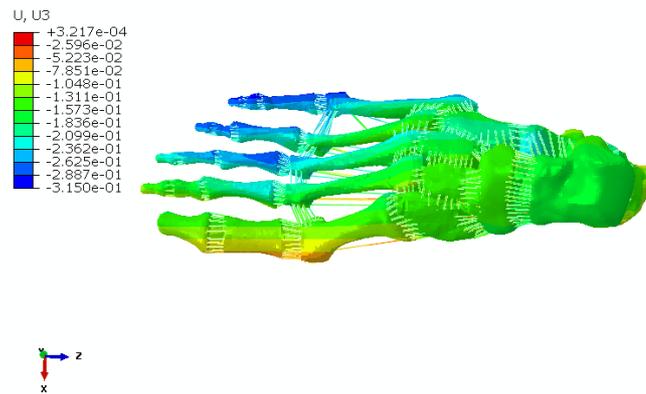


Figura 65: caso sano

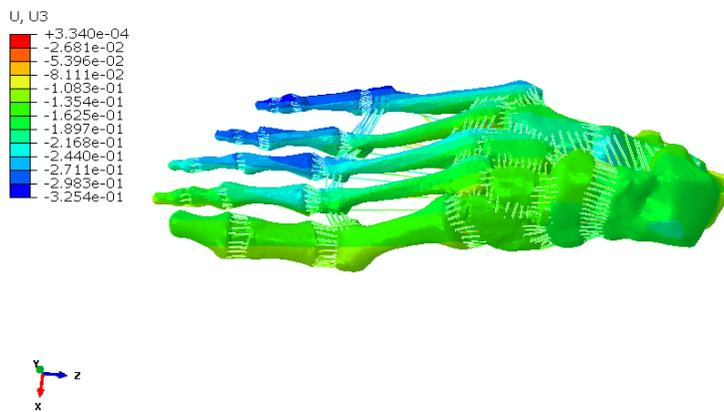


Figura 66: caso de la extracción del sesamoideo medial.

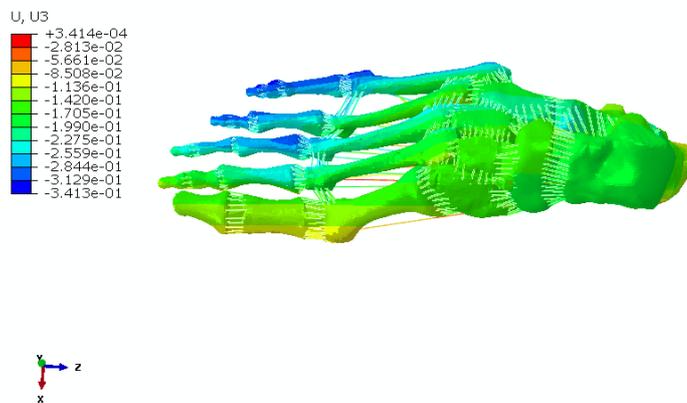


Figura 67: caso de la extracción del sesamoideo lateral.

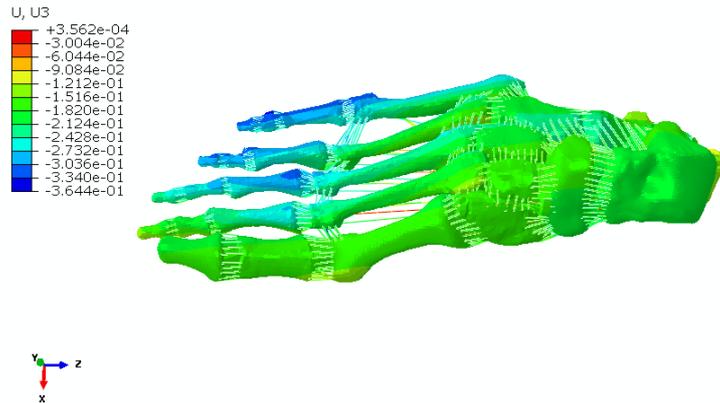


Figura 68: caso extracción de los dos sesamoideos.

Al comparar las imágenes de los desplazamientos producidos, se aprecia como el primer dedo del pie, según se le extraiga el sesamoideo medial, lateral o los dos, varia su posición desplazándose cada vez más en sentido lateral.

A continuación se muestra una tabla con los desplazamientos máximos en el eje anteroposterior y mediolateral de los metatarsianos.

	AP	ML
NORMAL	0.4793mm	0.3145mm
MEDIAL	0.4945mm	0.3249mm
LATERAL	0.5085mm	0.3413mm
LATERAL Y MEDIAL	0.5168mm	0.3644mm

Tabla 3: desplazamientos del pie en el plano anteroposterior y mediolateral.

Al extraer uno de los sesamoideos o los dos se produce un aumento de los desplazamientos en cualquiera de los dos ejes, siendo mayor en el caso de la extracción de los dos sesamoideos y menor en el caso de la extracción del sesamoideo medial.

7.2.5. RESUMEN

Se aprecian similitudes en todos los casos y por lo general en la misma zona o región. Los máximos de compresión o tracción varían pero no lo hacen de manera significativa.

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

El primer y segundo metatarsiano son los que más cambios experimentan en relación con los demás metatarsianos. El primer metatarsiano ve disminuida la tracción o compresión que soporta al extraer los sesamoideos, y varía su mapa de tensiones. Sin embargo, en el segundo metatarsiano se produce un aumento de la tracción que soporta en la región cercana al extremo distal. Con respecto a la compresión, no se produce una alteración muy notable, pero se produce un cambio en el mapa de tensiones de este dedo.

En el análisis de los desplazamientos vemos como claramente varían los desplazamientos al realizar la extracción de los sesamoideos, siendo mayor en el caso de la extracción de los dos sesamoideos, si comparamos los desplazamientos producidos solo en los metatarsianos.

Mpa	TRACCIÓN	COMPRESIÓN
SIN EXTRACCIÓN	37.15	32.91
EXT. MEDIAL	39.59	34.43
EXT. LATERAL	39.38	36.13
EXT. MEDIAL Y LATERAL	39.14	38.18

Tabla 4: máxima tracción y compresión en los metatarsianos.

8. CONCLUSIONES

Con los resultados que hemos obtenido y hemos analizado, vamos a sacar unas conclusiones que, aparte de las condiciones que hemos impuesto nosotros, se ven afectadas por otros factores como la edad, el peso, actividad física y trastornos del pie que pueda sufrir distintas personas.

8.1. CALCÁNEO

En este caso, hemos observado que al extraer parte del calcáneo se produce una nueva distribución de las tensiones a lo largo del hueso, un ligero aumento de las tensiones máximas y mínimas, y una concentración de tensiones en la zona circundante a la extracción.

Aunque las tensiones máximas o mínimas no hayan aumentado de manera muy significativa, la nueva configuración que adquiere el mapa de tensiones del hueso, puede conllevar molestias o a la aparición de defectos en el hueso debido a la sobrecarga de zonas del calcáneo que no se sobrecargarían en un estado normal. A todo esto, debemos sumar factores que no se han tenido en cuenta durante el estudio como son el peso, la edad y la actividad física, que podrían contribuir a la aparición de molestias o lesiones.

Cada hueso tiene una morfología preparada para soportar distintas situaciones, si se produce una alteración en esta, las cualidades del hueso se ven mermadas.

En el caso de los desplazamientos no se aprecian cambios muy relevantes. Se produce una variación de los desplazamientos, como consecuencia de la alteración de la estructura del pie.

8.2.SESAMOIDEOS

En el estudio de la extracción de los sesamoideos, hemos apreciado que en cualquiera de los tres casos los huesos más afectados han sido el primer y segundo metatarsiano.

En cualquiera de los tres casos se produce una descarga tanto de tracción como de compresión en el primer metatarsiano. Que en el caso de producirse molestias en este, con cualquiera de los tres procedimientos quirúrgicos, se conseguiría una mejoría.

Por el contrario, se produce un aumento de las tensiones cerca del extremo distal del segundo metatarsiano ya que aumenta la carga que tiene que soportar la cabeza de este, debido a la pérdida de un punto de apoyo o de los dos. Estos cambios pueden provocar molestias.

El aumento de la tensión máxima se produce en el caso de la extracción del sesamoideo medial, aunque los valores son muy similares en todos los casos. En cuanto a la compresión, el máximo aumento se produce en el caso de la extracción de ambos sesamoideos.

Con respecto a los desplazamientos, la nueva posición que adopta el primer dedo del pie es más que evidente, trasladándose cada vez más hacia el lateral. La variación en la forma de apoyar el pie, puede conllevar a la aparición de defectos o lesiones en pie o tobillo.

9. RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO

Partimos de un modelo de pie creado anteriormente para otros estudios. Tanto en el caso del espolón en el calcáneo como en el de los sesamoideos, el trabajo que hemos llevado a cabo es muy similar.

Hemos creado los grupos pertinentes en I-DEAS para simular los dos casos y para posteriormente poder observar los resultados en ABAQUS.

Una vez creados los grupos, los hemos exportado a ABAQUS, para obtener un archivo .INP que lo modificaremos aportando los datos que tenemos de cargas, condiciones de contorno, propiedades de los tejidos, etc.

Con la ayuda de Cluster, realizamos los cálculos y obtenemos un archivo .ODB que es el que nos permitirá abrir ABAQUS para poder observar los resultados.

Una vez que visualizamos los resultados, modificamos los límites de las leyendas para poder apreciar de una mejor forma, las variaciones que ha habido en cada caso y poder compararlas con el caso de referencia.

Con estos resultados hemos realizado un análisis y obtenido unas conclusiones.

10.BIBLIOGRAFÍA

Glez. de la Rubia , D. (s.f.). *Biomecanica del pie*. Madrid.

Sopena Juncosa, J., Carrillo Poveda, J., Rubio Zaragoza, M., Redondo García, J., Serra Aguado, I., & Soler i Canet, C. (s.f.). Estructura y función del cartilago articular. *Argos* 52.

Busto Villarreal, J. M., Fernández, F. M., & Rodriguez, C. M. (s.f.). Ostecondrosis de los sesamoideos. *Revista Mexicana de Ortopedia y Traumatología*.

H. Netter, F. (2000). *Atlas de anatomía humana*. Masson.

L. Drake, R., M.W. Mitchell, A., & Wayne Vogl, A. (2010). *Gray. Anatomía para estudiantes*. Elsevier España.

L. Moore, K., F. Dalley, A., & M. R. Agur, A. (2007). *Anatomía con orientación clínica* (Sexta ed.). Médica Panamericana.

Palastanga, N., Field, D., & Soames, R. (2000). *ANATOMÍA Y MOVIMIENTO HUMANO. ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO*. Paidotribo.

Schünke, M., Schulte, E., & Schumacher, U. (2010). *PROMETHEUS: Texto Y Atlas De Anatomia. Organos Internos*. Editorial Medica Panamericana.