



Escuela
Universitaria
Ingeniería
Técnica
Industrial
ZARAGOZA

INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL ESPECIALIDAD MECANICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

REALIZADO POR JAVIER CUADRA GIMÉNEZ

DIRIGIDO POR JAVIER BAYOD LÓPEZ

ZARAGOZA, SEPTIEMBRE DE 2012

INDICE

1. INTRODUCCION.....	4
1.1. OBJETIVO DEL PROYECTO.....	5
2. ANATOMIA DEL PIE.....	6
2.1. HUESOS DEL PIE	6
2.1.1. HUESOS DEL TARSO.....	7
2.1.2. METATARSIANOS.....	11
2.1.3. FALANGES	13
2.2. ARTICULACIONES.....	14
2.2.1. ARTICULACIONES DEL TOBILLO.....	14
2.2.2. ARTICULACIONES INTERTASIANAS.....	16
2.2.3. ARTICULACION SUBASTRAGALINA	17
2.2.4. ART. ASTRAGALOCALCANEONAVICULAR.....	18
2.2.5. ARTICULACION CALCANEOCUBOIDEA	19
2.2.6. ARTICULACIONES TARSOMETATARSIANAS.....	21
2.2.7. ARTICULACIONES METATARSOFALANGICAS	21
2.2.8. ARTICULACIONES INTERFALANGICAS	21
2.3. FASCIAS DEL PIE	23
2.3.1. FASCIAS PLANTARES DEL PIE.....	23
2.3.2. FASCIA PLANTAR DEL PIE.....	23
3. MODELOS DE MEF	25
3.1. PUNTO DE PARTIDA	25
3.1.1. MODELO DE PIE APOYADO	26
3.1.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS.....	27
3.2. TRABAJO EN I-DEAS.....	28
3.2.1. MODELO DE PIE APOYADO	30
3.2.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS.....	30
4. MATERIALES Y PROPIEDADES	31
4.1. ESPONJOSO	31
4.2. CORTICAL.....	32
4.3. CARTILAGO.....	32

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

4.4. LIGAMENTOS.....	33
4.4.1. LIGAMENTOS FINOS	33
4.4.2. LIGAMENTOS PLANTARES	33
4.4.3. FASCIA PLANTAR.....	34
5. CONDICIONES DE APOYO	35
5.1. CICLO DE LA MARCHA HUMANA.....	35
5.2. CONDICIONES DE CONTORNO	39
5.2.1. MODELO DE PIE APOYADO	39
5.2.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS.....	39
6. CARGAS	41
6.1. MODELO DE PIE APOYADO	41
6.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS.....	42
7. ANALISIS Y RESULTADOS	43
7.1. MODELO DE PIE APOYADO	45
7.1.1. TENSIONES MAXIMAS. TRACCIÓN	45
7.1.2. TENSIONES MINIMAS. COMPRESIÓN.....	48
7.1.3. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 1. U1.....	50
7.1.4. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 2. U2.....	52
7.1.5. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 3. U3.....	54
7.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS.....	56
7.2.1. TENSIONES MAXIMAS. TRACCIÓN	56
7.2.2. TENSIONES MINIMAS. COMPRESION.....	58
7.2.3. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 1. U1.....	60
7.2.4. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 2. U2.....	62
7.2.5. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 3. U3.....	64
8. CONCLUSIONES:.....	66
8.1.1. MODELO DE PIE APOYADO	66
8.1.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS.....	66
8.2. RESUMEN	66

1. INTRODUCCION

El grupo de investigación GEMM (Grupo de mecánica estructural y modelado de materiales), perteneciente al I3A (Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón), se dedica a la investigación dentro del área de Mecánica Computacional. El GEMM tiene tres líneas de investigación principales:

- Integridad estructural de materiales y estructuras.
- Biomecánica y mecanobiología.
- Simulación de procesos de conformado.

Estas líneas de investigación se abordan mediante simulación numérica, que posteriormente se validaran mediante ensayo.

El presente proyecto final de carrera se encuadra dentro de la Biomecánica Computacional orientada al estudio de los materiales del cuerpo humano para la prevención, diagnóstico y tratamiento de las condiciones biomecánicas y las enfermedades de músculos y huesos del cuerpo humano. Se desarrollan simulaciones de estructuras biológicas que describen el comportamiento de la estructura en determinadas situaciones.

La Biomecánica es una disciplina de la Ingeniería Biomédica o Bioingeniería. Esta rama de la ingeniería tiene como objeto aplicar los principios y técnicas de la ingeniería en el campo de la medicina. Se dedica principalmente al desarrollo de productos y tecnologías sanitarias como equipos médicos, prótesis, métodos de diagnóstico y de terapia de las diversas dolencias.

Las fracturas óseas pueden ocasionar un riesgo significativo para la salud del paciente, o no sanar de forma natural. El hueso posee la capacidad de regenerarse completamente, pero requiere que el tamaño de la fractura sea muy pequeña, en caso contrario de un andamio para que pueda regenerarse. Este andamio se consigue mediante injertos de hueso, procedimiento quirúrgico que reemplaza el hueso que falta en la fractura.

Los injertos óseos pueden ser de la siguiente naturaleza:

- Injerto autólogo: se extrae tejido óseo de huesos no esenciales del propio paciente para injertarlo en la fractura. El riesgo de rechazo es reducido.
- Aloinjerto: el tejido óseo necesario se extrae de un cadáver o de un banco de huesos. Existe un riesgo considerable de que el receptor experimente rechazo.
- Injerto sintético: el andamio que se aporta en el injerto procede de hueso artificial. El riesgo de rechazo es nulo y además es completamente estéril, por lo que el riesgo de infección es mínimo.

Como ya hemos mencionado, el injerto óseo es posible porque el tejido óseo, a diferencia de la mayoría de los tejidos, tiene la capacidad de regenerarse completamente si se le proporciona el espacio necesario. A medida que el hueso se va regenerando, el hueso injertado es reemplazado por hueso nativo. Los mecanismos biológicos que permiten esta regeneración son los siguientes:

- Osteoconducción: se produce cuando el material de injerto óseo sirve como andamio para el crecimiento de hueso nuevo que se desarrolla a partir del hueso nativo. Los osteoblastos aprovechan el injerto como un marco en el cual se difunden para generar el hueso nuevo. Cualquier material empleado en injertos debe ser osteoconductor.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

- Osteoinducción: consiste en la estimulación de las células osteoprogenitoras de diferenciarse en osteoblastos, que contribuyen en la formación de hueso nuevo. Si el material de injerto es osteoinductivo (siendo además osteoconductor) promoverá una integración más rápida del injerto.
- Osteopromoción: implica una mejora de la osteoinducción sin poseer las propiedades osteoinductivas. Esta propiedad puede potenciar efectos osteoinductivos en algunos casos pero no en otros (por ejemplo puede potenciar la regeneración del hueso procedente de aloinjertos pero no favorecer la regeneración de hueso nuevo)
- Osteogénesis: se da cuando los osteoblastos vitales procedentes del material de injerto óseo contribuyen al crecimiento de hueso nuevo junto con el crecimiento del hueso generado a través de la osteoconducción y la osteoinducción.

El autoinjerto o injerto autólogo exige de cirugía previa extraer el tejido óseo necesario para el injerto. Esto supone para el paciente otro lugar potencial de dolor postoperatorio y complicaciones. Pese a ello, de las tres clases de injertos óseos, el autoinjerto es la preferida porque es la única que permite la osteogénesis, acelerando de forma significativa la recuperación del paciente.

Parte esencial del autoinjerto consiste en encontrar el hueso idóneo donde realizar la extracción de hueso. Tradicionalmente el hueso extraído procede de la cresta ilíaca, pese a que presenta complicaciones entre el 10% y el 49% de las operaciones, entre las que se incluyen potenciales lesiones, dolor prolongado, parálisis, falta de sensibilidad, infecciones y problemas en la cicatrización.

Se han estudiado alternativas como la tibia distal y proximal, el peroneo o el radio distal que presentan, relativamente, menos complicaciones pero el volumen de hueso que puede ser extraído es menor.

Otra opción que merece ser considerada es la extracción de tejido óseo en el primer metatarso. Nos hemos centrado en este hueso, porque no existe ningún estudio previo que determine el volumen de hueso que puede extraerse ni las consecuencias.

Partimos de la hipótesis de que no se puede aislar una parte del pie sin que influya de forma determinante sobre el conjunto. Por tanto en este estudio, consideraremos el pie entero en los modelos computacionales.

1.1. OBJETIVO DEL PROYECTO

Este proyecto final de carrera parte de una propuesta planteada por el médico Ricardo Larrainzar Garito, y considerando como punto de partida diversos modelos del pie humano realizados en I-DEAS.

El proyecto tiene como fin estudiar las tensiones que se alcanzan en el hueso del primer metatarso al realizarse una extracción de tejido óseo, así como determinar cuánto tejido puede extraerse sin que el dolor causado por las tensiones alcanzadas en el hueso sea excesivo ni exista riesgo de fractura.

Para ello, el estudio se realizará sobre dos modelos del pie en I-DEAS con las dos posiciones límites que alcanza el pie al caminar: El primer modelo considera que el pie está completamente apoyado, mientras que en el segundo consideraremos el pie de puntillas.

2. ANATOMIA DEL PIE

Como el estudio que realizaremos comprende el pie humano, previamente es necesario conocer la morfología del pie humano. Según el tipo de tejido, la composición del pie humano se puede clasificar en tres grupos: huesos, tendones y músculos.

Dado que en el estudio trataremos únicamente con huesos y tendones, detallaremos a continuación estos dos grupos exclusivamente.

2.1. HUESOS DEL PIE

El esqueleto del pie se divide en tres grupos generales.

- Los huesos del tarso que forman el armazón del esqueleto del tobillo.
- Los metatarsianos.
- Las falanges, que forman el esqueleto de los dedos del pie, y se componen de tres huesos cada falange, a excepción del dedo gordo formada por dos huesos.

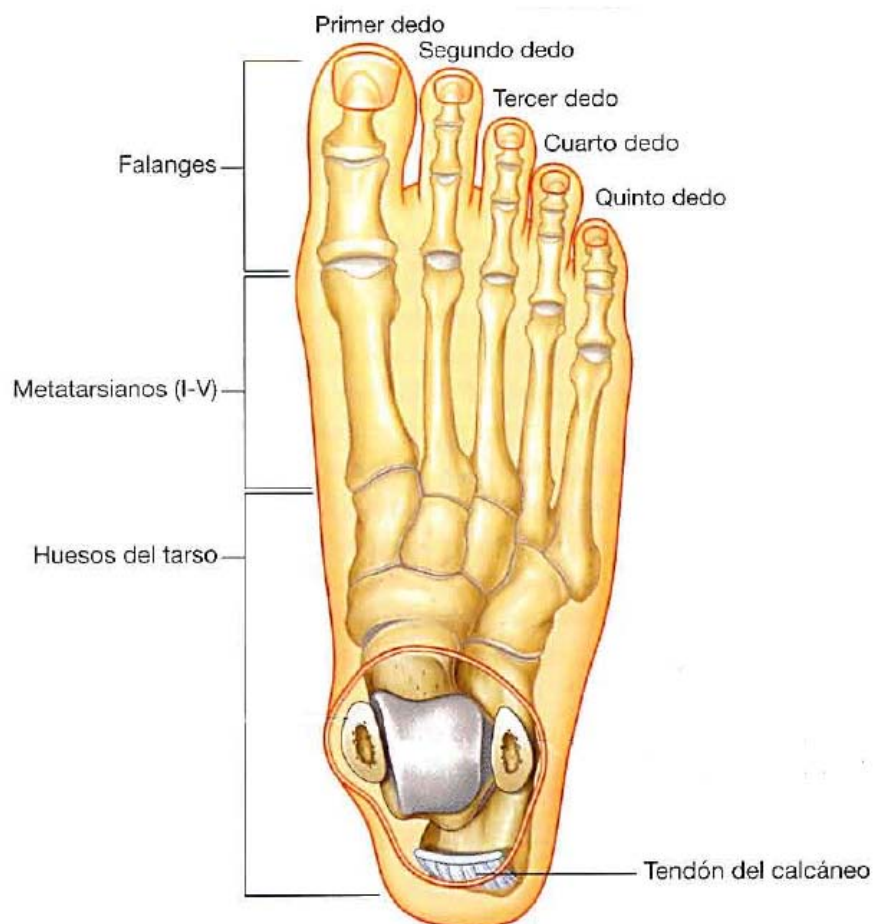


Figura 1. Cara dorsal de un pie izquierdo

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

2.1.1. HUESOS DEL TARSO

Los huesos del tarso se disponen en un grupo proximal y otro distal unidos por un hueso medial. El grupo proximal consta de dos huesos grandes, el astrágalo y el calcáneo. El hueso intermedio del tarso lo compone el Navicular; y el grupo distal está formado por el cuboides y tres cuneiformes: el medial, el intermedio y el lateral. A continuación se detallan con profundidad los huesos que componen el tarso.

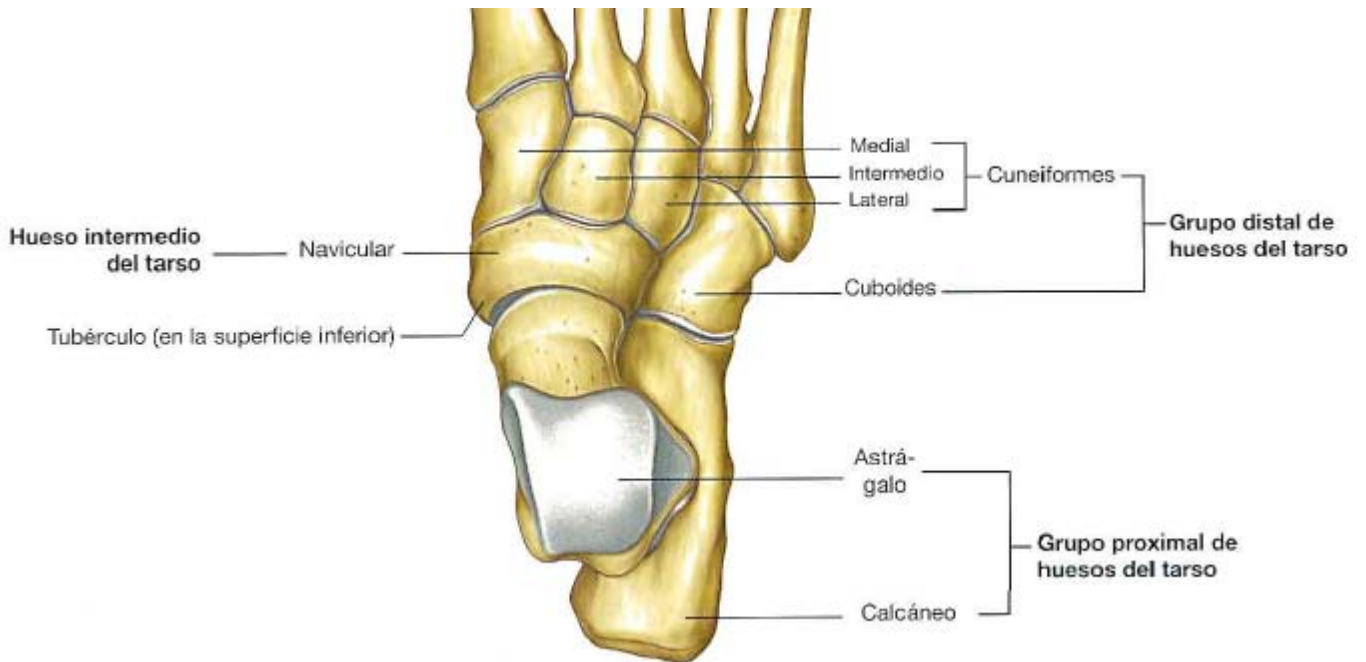


Figura 2. Vista dorsal de los huesos del tarso

ASTRAGALO

El astrágalo tiene una cabeza redondeada que se proyecta hacia delante y en sentido medial al final de un cuello ancho corto, que se conecta por detrás con un cuerpo expandido. A nivel anterior, la cabeza del astrágalo tiene forma de cúpula para articularse con una depresión circular correspondiente, situada en la superficie posterior del hueso navicular. A nivel inferior, esta superficie articular abovedada se continua con tres carillas articulares adicionales, separadas por crestas lisas.

- Las carillas anterior y media se articulan con las superficies adyacentes del hueso calcáneo.
- La otra carilla, medial a las carillas de articulación con el calcáneo, se articula con un ligamento (el ligamento calcaneonavicular plantar), que conecta el calcáneo con el navicular por debajo de la cabeza del astrágalo.

El cuello del astrágalo está delimitado por un surco profundo (surco del astrágalo) que pasa en sentido oblicuo hacia delante a través de la superficie inferior de medial a lateral y se expande en gran medida en la cara lateral.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

La cara superior del cuerpo del astrágalo esta elevada para ajustarse al hueco formado por los extremos distales de la tibia y el peroné para formar la articulación del tobillo:

- La superficie superior de esta región se articula con el extremo inferior de la tibia.
- La superficie medial se articula con el maléolo medial de la tibia.
- La superficie lateral se articula con el maléolo lateral del peroné.

Debido a que el maléolo lateral es mayor y se proyecta a nivel más inferior que el maléolo medial a la altura de la articulación del tobillo, la superficie articular lateral correspondiente sobre el astrágalo es mayor y se proyecta a nivel más inferior que la superficie medial.

La parte inferior de la superficie lateral del cuerpo del astrágalo, que soporta la parte inferior de la carilla articular para la articulación con el peroné, forma una proyección ósea (la apófisis lateral).

La superficie inferior del cuerpo del astrágalo tiene una gran carilla oval cóncava (la carilla articular calcánea posterior) para articularse con el calcáneo.

La carilla posterior del cuerpo del astrágalo consta de una proyección dirigida en sentido posterior y medial (la apófisis posterior). Esta proyección está delimitada en su superficie por un tubérculo lateral y un tubérculo medial, que forman entre si el surco para el tendón flexor largo del dedo gordo a su paso por la pierna hacia el pie.

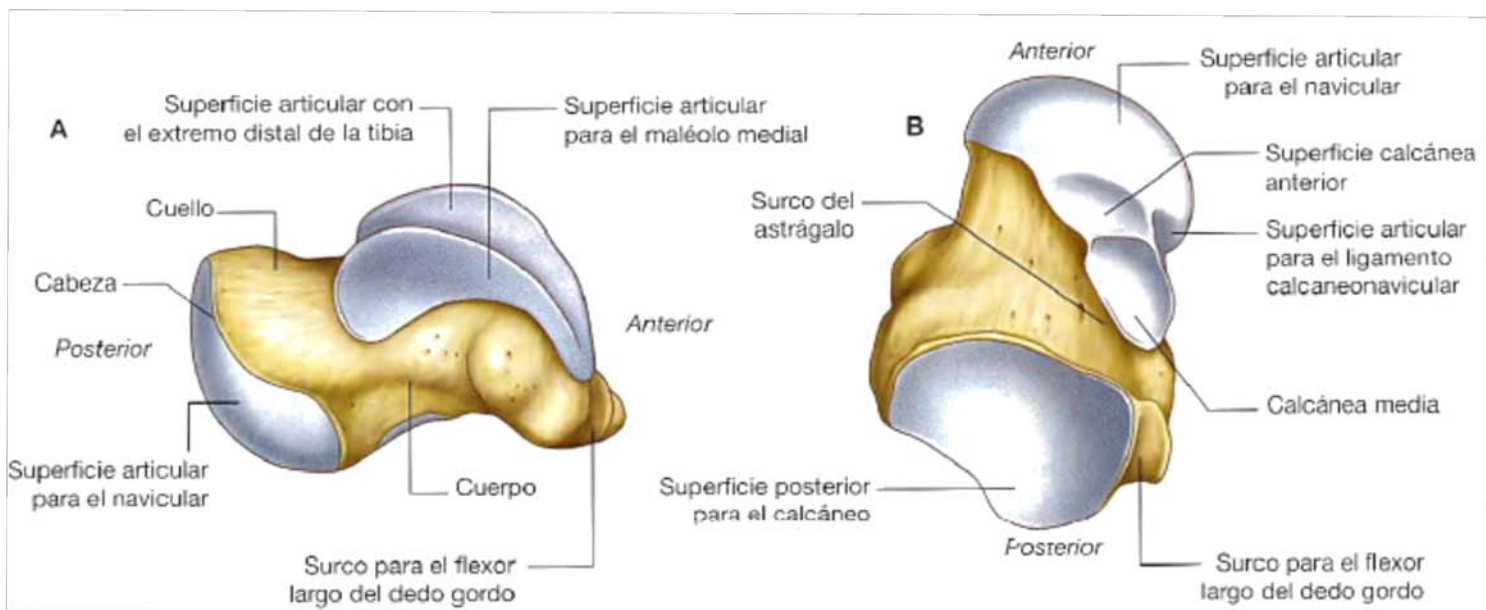


Figura 3. Vista medial (A) y vista lateral (B) del astrágalo

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

CALCANEEO

El calcáneo se asienta debajo del astrágalo, al que soporta. Es un hueso alargado con forma de caja irregular, con su eje longitudinal orientado a lo largo de la línea media del pie, pero que se desvía en un sentido lateral respecto a la línea media a nivel anterior.

El calcáneo se proyecta por detrás de la articulación del tobillo para formar la estructura esquelética del talón. La superficie posterior de la región del talón es circular y se divide en las partes superior, media e inferior. El tendón calcáneo (tendón de Aquiles) se inserta en la parte media:

- La parte superior está separada del tendón calcáneo por una bolsa sinovial.
- La parte inferior se curva hacia delante, está cubierta por tejido subcutáneo, es la región del talón que soporta el peso y se continúa con la superficie plantar del hueso.

La parte inferior del calcáneo se proyecta hacia delante en la superficie plantar. En el extremo anterior de la superficie plantar hay un tubérculo (tubérculo calcáneo) para la inserción posterior del ligamento plantar corto de la planta del pie.

La superficie lateral del calcáneo tiene un contorno liso, excepto por dos regiones ligeramente elevadas. Una de estas áreas elevadas, la tróclea peroneal, es anterior a la línea de la superficie y presenta dos surcos poco profundos, que pasan uno por encima y el otro de forma oblicua a través de su superficie.

Los tendones de los músculos peroneo corto y largo están unidos a la tróclea a su paso por la cara lateral del calcáneo.

Superior y posterior a la tróclea peroneal hay una segunda área elevada para la inserción del ligamento colateral lateral de la articulación del tobillo.

La superficie medial del calcáneo es cóncava y muestra una característica prominente en su borde superior, que es un saliente del hueso que se proyecta en sentido medial y soporta la parte más posterior de la cabeza del astrágalo.

La cara inferior del sustentáculo del astrágalo tiene un surco marcado que discurre de posterior a anterior, a lo largo del cual discurre el tendón del músculo flexor largo del dedo gordo hacia la planta del pie.

La superficie superior del sustentáculo del astrágalo tiene una carilla (cara articular media del astrágalo) para articularse con la carilla media correspondiente de la cabeza del astrágalo.

Las caras articulares astragalinas anterior y posterior están en la superficie superior del propio calcáneo:

- La cara articular astragalina anterior es pequeña y se articula con la correspondiente cara anterior situada en la cabeza del astrágalo.
- La cara articular astragalina posterior es grande y se encuentra bastante cerca del punto medio de la cara superior del calcáneo.

Entre la cara articular astragalina posterior, que se articula con el cuerpo del astrágalo, y las otras dos caras articulares, que se articulan con la cabeza del astrágalo, hay un surco profundo, el surco calcáneo.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

El surco calcáneo en la superficie superior del calcáneo y el surco del astrágalo en la superficie inferior del astrágalo forman juntos el seno del tarso, un gran espacio existente entre los extremos anteriores del calcáneo y el astrágalo.

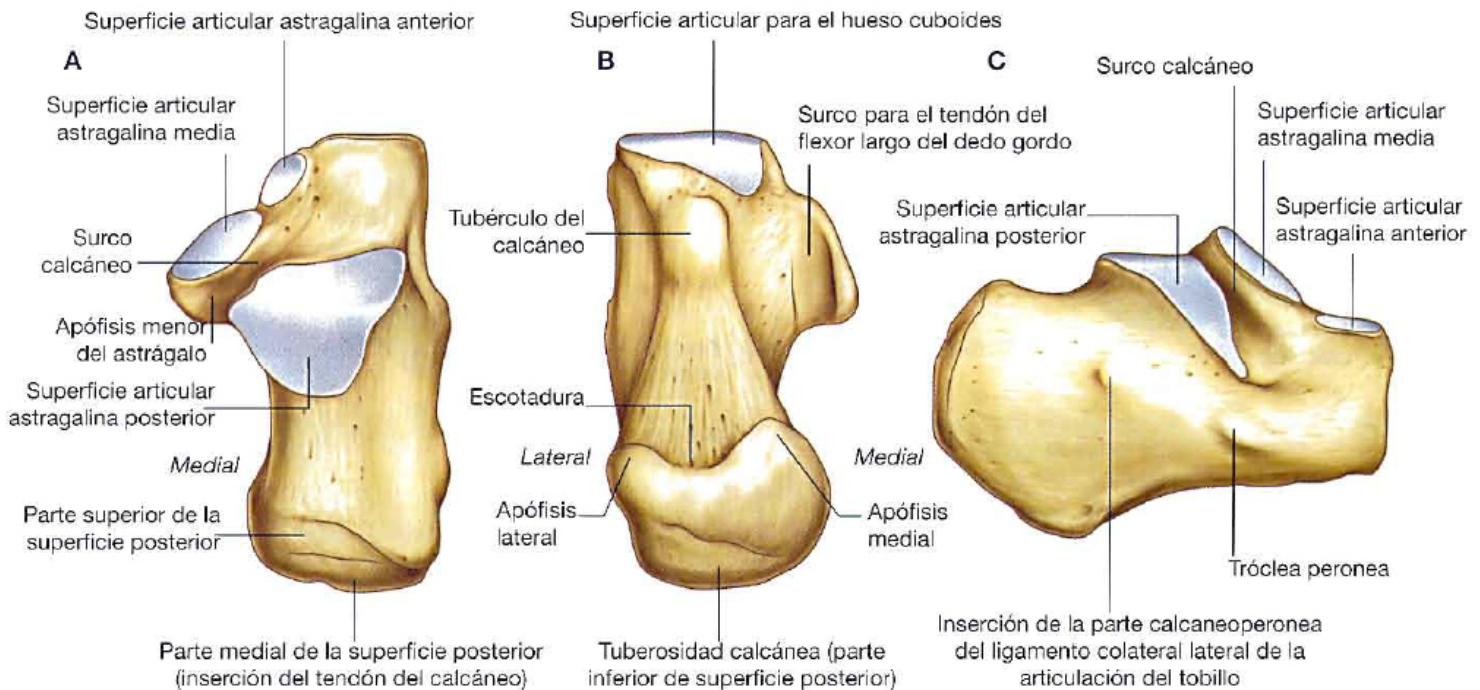


Figura 4. Vista superior (A), vista inferior (B) y vista lateral (C) del calcáneo.

NAVICULAR

Este hueso se articula por detrás con el astrágalo y por delante y por la cara lateral con el grupo distal de huesos del tarso.

Presenta una tuberosidad redondeada prominente para la inserción del tendón del tibial posterior, que se proyecta hacia abajo sobre la cara medial de la superficie plantar del hueso.

CUBOIDES

La cara posterior del cuboides se articula por con el calcáneo y por delante, la cara anterior se articula con las bases de los dos metatarsianos laterales, el cuarto y el quinto. La cara dorsal es rugosa, mientras la cara plantar está atravesada por un surco ancho (cresta del cuboides).

El cuboides tiene forma de prisma triangular en cuya arista convergen las caras plantar y dorsal del cuboides.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

CUNEIFORMES

Son tres huesos: los huesos cuneiformes lateral, intermedio y medial. Se articulan por detrás con el hueso navicular y por delante con las bases de los tres metatarsianos. Tienen forma de cuña, la primera con la base plantar y las otras dos con la base dorsal

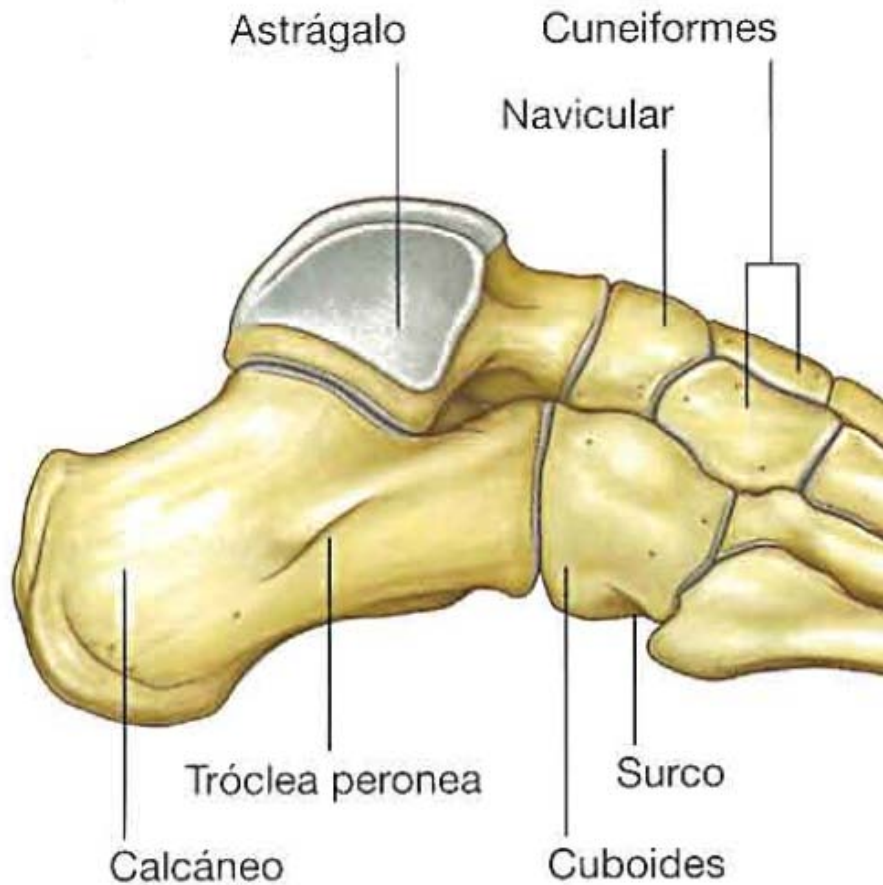


Figura 5. Vista lateral del tarso de un pie izquierdo.

2.1.2. METATARSIANOS

Existen cinco metatarsianos en el pie, numerados de 1 al 5 de medial a lateral. El primer metatarsiano, asociado con el dedo gordo, es el más corto y grueso, mientras que el segundo es el más largo.

Cada metatarsiano tiene una cabeza en su extremo distal, una diáfisis alargada en la zona media y una base proximal.

La cabeza de cada metatarsiano se articula con la falange proximal de un dedo y la base con uno o más huesos del grupo distal del tarso. La superficie plantar de la cabeza del primer metatarsiano también se articula en dos huesos sesamoideos.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

Las caras laterales de las bases del segundo al quinto metatarsianos también se articulan entre sí. La cara lateral de la base del quinto metatarsiano tiene una tuberosidad prominente que se proyecta hacia atrás y es la zona de inserción del tendón del músculo peroneo corto.

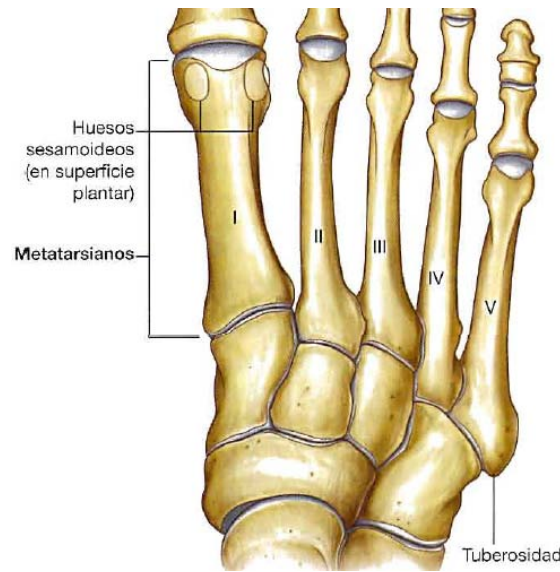


Figura 6. Vista dorsal de los metatarsianos

PRIMER METATARSO

Como el proyecto esta centrado en el analisis del primer metatarso, conviene ampliar la informacion de este hueso. Su base presenta una superficie articular semilunar, cóncava y de eje mayor vertical, así como dos eminencias, una medial y otra lateral. La eminencia medial es llamada tubérculo medial, se sitúa en el borde posterior medial de este hueso. La eminencia lateral es llamada tuberosidad del primer metatarsiano, es más saliente que el anterior. El primer metatarsiano tiene huesos sesamoideos.

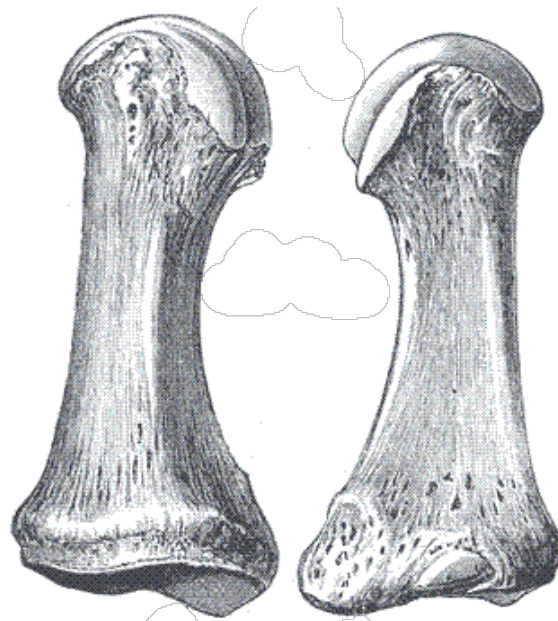


Figura 7. Vista dorsal y plantar del primer metatarsiano

2.1.3. FALANGES

Las falanges son los huesos de los dedos. Cada dedo tiene tres falanges, las falanges proximal, media y distal, con la excepción del dedo gordo que solo tiene dos (la falange media y distal).

Cada falange consta de una base, una diáfisis y una cabeza distal:

- La base de cada falange proximal se articula con la cabeza del metatarsiano con el que se relaciona.
- La cabeza de cada falange distal no se articula y se aplana con una tuberosidad plantar al final del dedo.

En cada dedo, la longitud total de todas las falanges juntas es mucho más corta que la longitud del metatarsiano asociado.

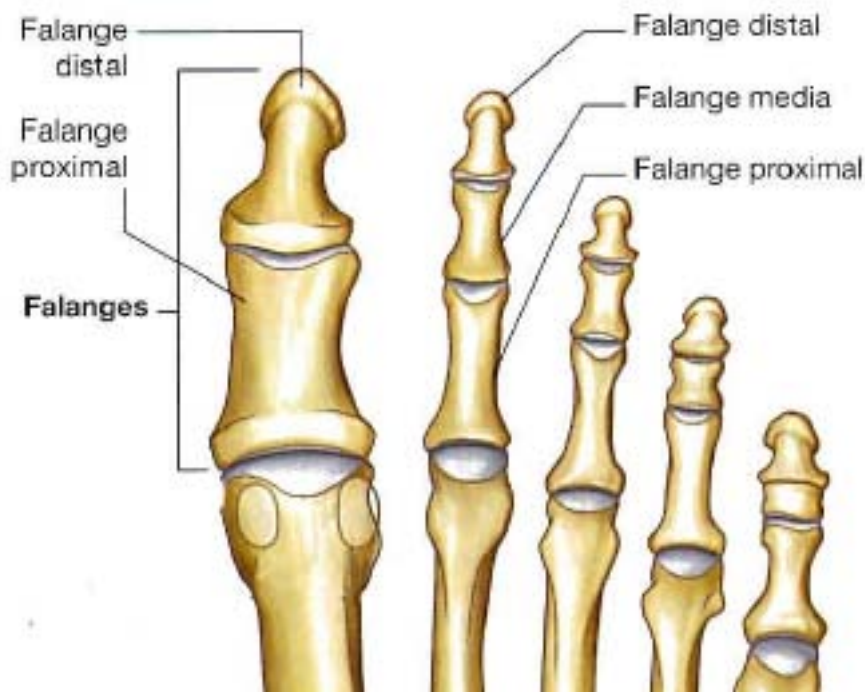


Figura 8. Vista dorsal de las falanges de un pie izquierdo.

2.2. ARTICULACIONES

El pie comprende las siguientes articulaciones:

- Articulaciones del tobillo.
- Articulaciones intertarsianas.
- Articulacion subastragalina.
- Articulacion astragalocalcaneonavicular.
- Articulacion calcaneocuboidea.
- Articulaciones tarsometatarsianas.
- Articulaciones metatarsofalangicas.
- Articulaciones interfalangicas.

2.2.1. ARTICULACIONES DEL TOBILLO

La articulación del tobillo es de tipo sinovial y engloba al astrágalo del pie y a la tibia y el peroné de la pierna. La articulación del tobillo permite sobre todo una flexión dorsal y plantar de tipo bisagra del pie sobre la pierna.

El extremo distal del peroné está firmemente anclado al extremo distal mayor de la tibia por fuertes ligamentos. Juntos, la tibia y el peroné crean un hueco profundo en forma de paréntesis para la parte superior expandida del cuerpo del astrágalo:

- El techo del hueco lo forma la superficie inferior del extremo distal de la tibia.
- La cara medial del hueco está formada por el maléolo medial de la tibia.
- La cara lateral más grande del hueco está formada por el maléolo lateral del peroné.

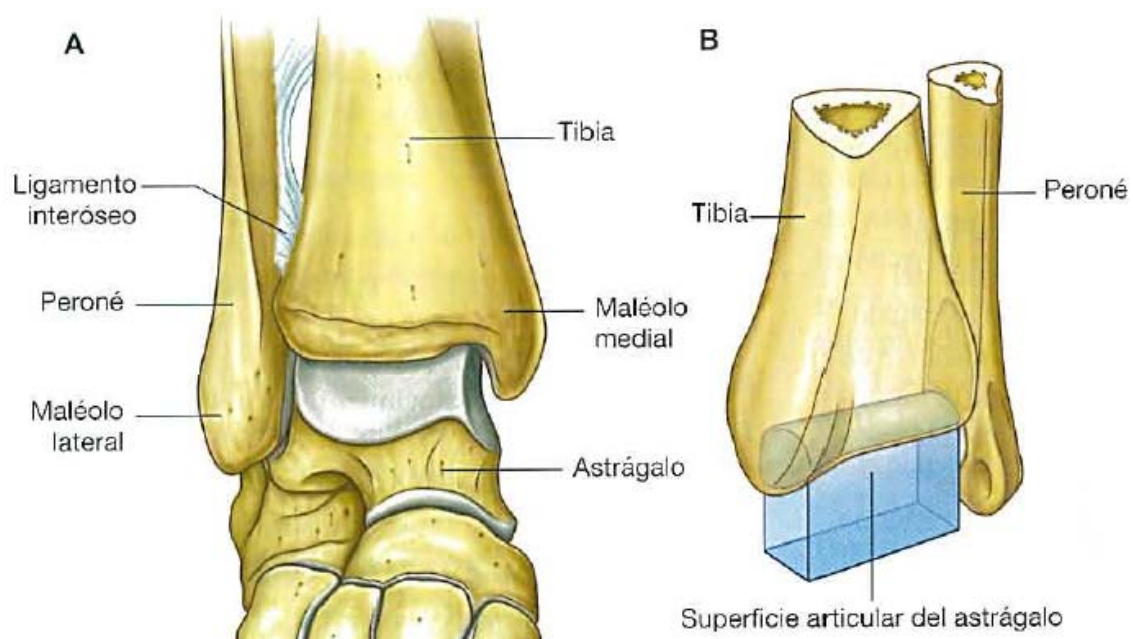


Figura 9. Articulacion del tobillo. Vista anterior (A) y esquema de la articulacion (B)

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

Las superficies articulares están cubiertas de cartílago hialino. La parte articular del astrágalo tiene forma de medio cilindro corto coronado en su lado plano con un extremo orientado en sentido lateral y otro hacia el medial. La superficie superior curva del medio cilindro y los dos extremos están cubiertos por cartílago hialino y se ajustan en el hueco en forma de paréntesis formado por los extremos distales de la tibia y el peroné.

Cuando se ve desde arriba, la superficie articular del astrágalo es mucho más ancha a nivel anterior que posterior. Debido a ello, el hueso se acopla de forma más ajustada a su hueco cuando el pie esta en flexión dorsal y la superficie más ancha del astrágalo se mueve hacia la articulación del tobillo cuando el pie esta en flexión plantar y la parte más estable cuando el pie se encuentra en flexión dorsal. La articulación del tobillo es estabilizada por los ligamentos medial y lateral.

LIGAMENTO MEDIAL

El ligamento medial es grande, fuerte y de forma triangular. Su vértice se inserta por encima al maléolo medial, y por debajo su base amplia se inserta a una línea que se extiende desde la tuberosidad del hueso navicular por delante hasta el tubérculo medial del astrágalo por detrás. El ligamento medial se subdivide en cuatro porciones en función de los puntos inferiores de inserción.

- La porción que se inserta por delante al tubérculo del navicular y al borde asociado al ligamento calcaneonavicular plantar es la porción tibionavicular del ligamento deltoideo.
- La porción tibiocalcánea, con una posición más central, se inserta en el sustentáculo del astrágalo.
- La porción tibioastragalina posterior se inserta en la cara medial y en el tubérculo medial del astrágalo.
- La porción tibioastragalina anterior es profunda a las porciones tibionavicular tibiocalcánea del ligamento medial y se inserta en la superficie medial del astrágalo.

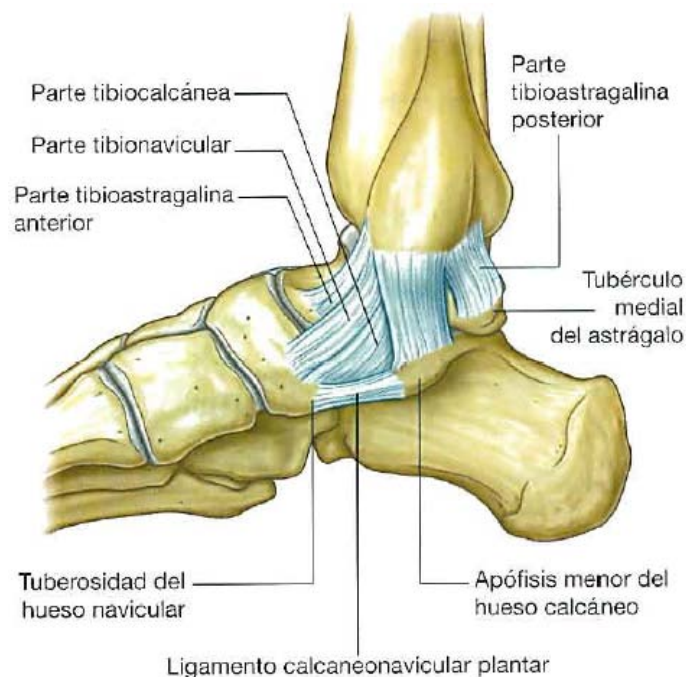


Figura 10. Ligamento medial de la articulación del tobillo

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

LIGAMENTO LATERAL

El ligamento lateral del tobillo se compone por tres ligamentos separados: el ligamento astragaloperoneo anterior, el astragaloperoneo posterior y el calcaneoperoneo:

- El ligamento astragaloperoneo anterior es un ligamento corto y se inserta en el borde anterior maléolo lateral hasta la región adyacente del astrágalo.
- El ligamento astragaloperoneo posterior discurre en horizontal en sentido posterior y medial desde la fosa maleolar situada en la cara medial del maléolo lateral hasta la apófisis posterior del astrágalo.
- El ligamento calcaneoperoneo se inserta por encima en la fosa maleolar situada en la cara posteromedial del maléolo lateral y pasa en sentido posteroinferior para insertarse por debajo a un tubérculo situado en la superficie lateral del calcáneo.



Figura 11. Vista lateral del ligamento lateral de la articulación del tobillo

2.2.2. ARTICULACIONES INTERTASIANAS

Las numerosas articulaciones sinoviales que existen entre los diferentes huesos del tarso sobre todo invierten, evierten, supinan y pronan el pie.

- La inversión y eversión se realizan girando toda la planta del pie en sentido medial o lateral, respectivamente.
- La pronación es la rotación de la parte delantera del pie en sentido lateral respecto de la parte posterior del pie, y la supinación es el movimiento inverso.

La pronación y supinación permiten al pie mantener un contacto normal con el suelo en diferentes posiciones de apoyo, o cuando se está en bipedestación sobre una superficie irregular.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

Las principales articulaciones en las que se producen movimientos son la subastragalina, la astragalocalcaneonavicular y la calcaneocuboide. Las articulaciones astragalocalcaneonavicular y calcaneocuboides forman juntas lo que se suele denominar articulación transversa del tarso. Las articulaciones intertarsianas entre los cuneiforme y entre estos y el navicular permiten solo un movimiento limitado. La articulación entre el cuboides y el navicular suele ser fibrosa.

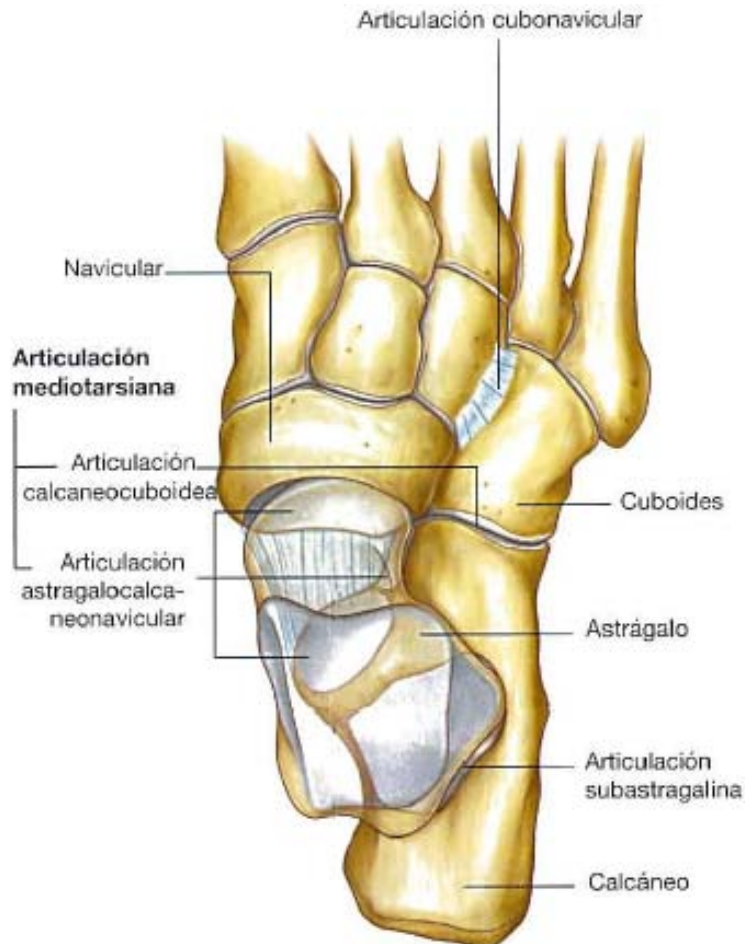


Figura 12. Articulaciones intertarsianas.

2.2.3. ARTICULACION SUBASTRAGALINA

La articulación subastragalina se produce entre:

- La gran carilla calcánea posterior, situada en la superficie inferior del astrágalo.
- La carilla astragalina posterior correspondiente, ubicada en la superficie superior del calcáneo.

La cavidad articular está cubierta de membrana sinovial que se cubre a su vez de una membrana fibrosa. La articulación subastragalina permite el deslizamiento y la rotación, que participan en la inversión y eversión del pie.

Los ligamentos astragalocalcáneos lateral, medial, posterior e interóseo estabilizan la articulación. El ligamento astragalocalcáneo interóseo se aloja en el seno del tarso.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

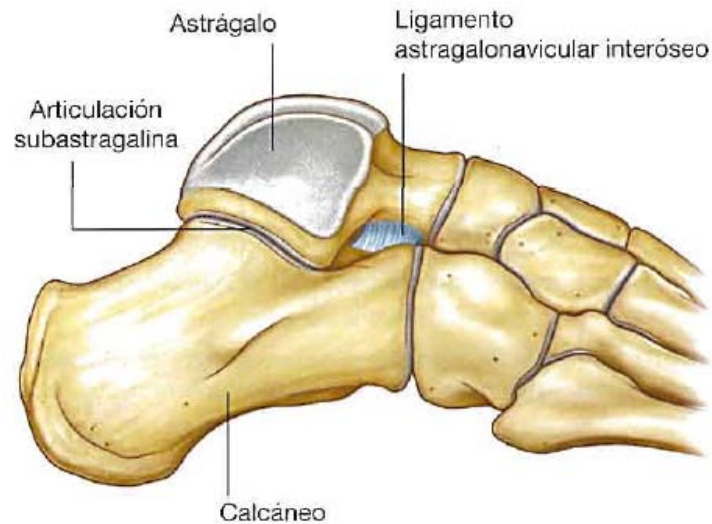


Figura 13. Vista lateral de la articulación subastragalina

2.2.4. ART. ASTRAGALCALCANEONAVICULAR

La articulación astragalocalcaneonavicular es una compleja articulación, en la cual la cabeza del astrágalo se articula con el calcáneo y el ligamento calcaneonavicular plantar por debajo y con el navicular por delante.

La articulación astragalocalcaneonavicular permite movimientos de deslizamiento y rotación, que junto con movimientos similares de la articulación subastragalina participan en la inversión y eversión del pie, así como en la pronación y supinación.

Las partes 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.
- Las carillas astragalinas anterior y media correspondientes, situadas en la superficie superior y en el sustentáculo del astrágalo, respectivamente, del calcáneo.

La parte de la articulación existente entre el astrágalo y el ligamento calcaneonavicular plantar se encuentra entre el ligamento y la carilla medial, situada sobre la superficie inferior de la cabeza del astrágalo.

La articulación entre el navicular y el astrágalo es la parte más grande de la articulación astragalocalcaneonavicular y está entre el extremo ovoide anterior de la cabeza del astrágalo y la superficie cóncava posterior correspondiente del navicular.

LIGAMENTOS DE LA ARTICULACION

La capsula de la articulación astragalocalcaneonavicular, que es de tipo sinovial, esta reforzada:

- A nivel posterior por el ligamento astragalocalcáneo interóseo.
- A nivel superior por el ligamento astragalonavicular, que pasa entre el cuello del astrágalo y las zonas adyacentes del navicular.
- A nivel inferior por el ligamento calcaneonavicular plantar.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

La parte lateral de la articulación astragalocalcaneonavicular esta reforzada por la parte calcaneonavicular del ligamento bifurcado, que es un ligamento en forma de Y situado por encima de la articulación. La base del ligamento bifurcado se inserta en la cara anterior de la superficie superior del calcáneo y sus brazos se insertan en:

- La superficie dorsomedial del cuboides (ligamento calcaneocuboideo).
- La parte dorsolateral de las inserciones naviculares que hay sobre la superficie dorsolateral del navicular y la dorsomedial del cuboides (ligamento calcaneonavicular).

El ligamento calcaneonavicular plantar es un ligamento grueso y ancho que se extiende entre el sustentáculo del astrágalo por detrás y el hueso navicular por delante. Soporta la cabeza del astrágalo, forma parte de la articulación astragalocalcaneonavicular y resiste la depresión del arco medial del pie.



Figura 14. Articulación astragalocalcaneonavicular. Vista medial del pie derecho

2.2.5. ARTICULACION CALCANEOCUBOIDEA

La articulación calcaneocuboidea es una articulación sinovial entre:

- La carilla situada sobre la superficie anterior del calcáneo.
- La carilla correspondiente, situada sobre la superficie posterior del cuboides.

Esta articulación permite los movimientos de deslizamiento y rotación que participan en la inversión y eversión del pie, y también contribuye a la pronación y supinación del antepié y del retropié.

LIGAMENTOS

La articulación calcaneocuboidea esta reforzada por el ligamento bifurcado y por los ligamentos plantar largo y calcaneocuboideo plantar (ligamento plantar corto).

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

El ligamento calcaneocuboideo plantar es corto, ancho y fuerte, y conecta el tubérculo calcáneo anterior con la superficie inferior del cuboides. No solo soporta la articulación calcaneocuboidea, sino que también ayuda al ligamento plantar largo a resistir la depresión arco lateral del pie.

El ligamento plantar largo es el ligamento más largo de la planta del pie y está por debajo del ligamento calcaneocuboideo plantar.

- A nivel posterior se inserta en la superficie inferior del calcáneo, entre la tuberosidad y el tubérculo anterior.
- A nivel anterior se inserta en una cresta ancha y en un tubérculo situado sobre la superficie inferior del hueso cuboides, por detrás del surco para el tendón peroneo largo.

Las fibras más superficiales del ligamentos plantar largo se extienden a las bases de los metatarsianos.

El ligamento plantar largo soporta la articulación calcaneocuboidea y es el ligamento más fuerte que resiste la depresión del arco lateral del pie.

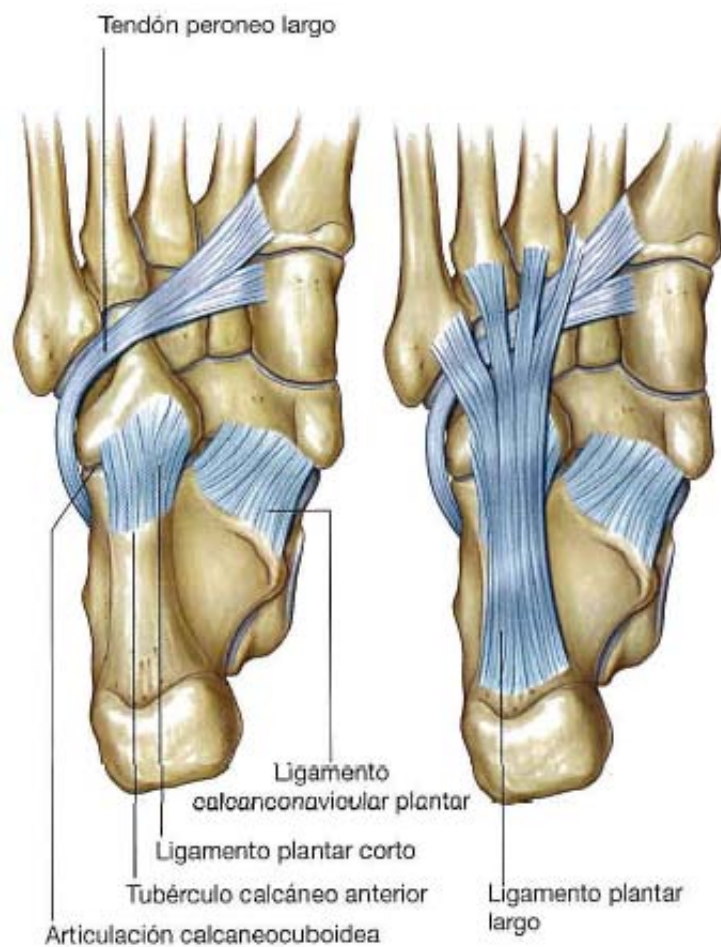


Figura 15. Ligamento calcaneocuboide plantar (A) y ligamento plantar largo (B).

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

2.2.6. ARTICULACIONES TARSOMETATARSIANAS

Las articulaciones tarsometatarsianas entre los huesos metatarsianos y los huesos del tarso adyacentes son articulaciones planas y 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 articulaciones tarsometatarsianas, con la articulación tarsal transversa, participan en la pronación y supinación del pie.

2.2.7. ARTICULACIONES METATARSOFALANGICAS

Las articulaciones metatarsofalángicas son articulaciones sinoviales elipsoidales entre las cabezas esféricas de los metatarsianos y las bases correspondientes de las falanges proximales de los dedos.

Las articulaciones metatarsofalángicas permiten la extensión y la flexión, y una abducción, aducción, rotación y circunducción limitadas.

Las capsulas articulares están reforzadas por los ligamentos colaterales medial y lateral y por los ligamentos plantares, que tienen surcos en sus superficies plantares para los tendones largos de los dedos.

LIGAMENTOS METATARSIANOS TRANSVERSOS PROFUNDOS

Cuatro ligamentos metatarsianos transversos profundos unen las cabezas de los metatarsianos entre si y permiten que estos actúen como una sola estructura unificada. Los ligamentos se mezclan con los ligamentos plantares de las articulaciones metatarsofalángicas adyacentes.

El metatarsiano del dedo gordo se orienta en el mismo plano que los metatarsianos de los otros dedos y está unido al metatarsiano del segundo dedo por un ligamento metatarsiano transverso profundo. Además, la articulación entre el metatarsiano del dedo gordo y el cuneiforme medial tiene una amplitud de movimiento limitada, por lo que el primer dedo tiene una función independiente muy restringida, al contrario que el pulgar de la mano no hay un ligamento profundo entre el metacarpiano y el hueso del carpo permite una gran amplitud de movimiento.

2.2.8. ARTICULACIONES INTERFALANGICAS

Las articulaciones interfalángicas son articulaciones de tipo bisagra que permiten sobre todo la flexión y la extensión. Están reforzadas por los ligamentos colaterales medial y lateral y por los ligamentos plantares.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

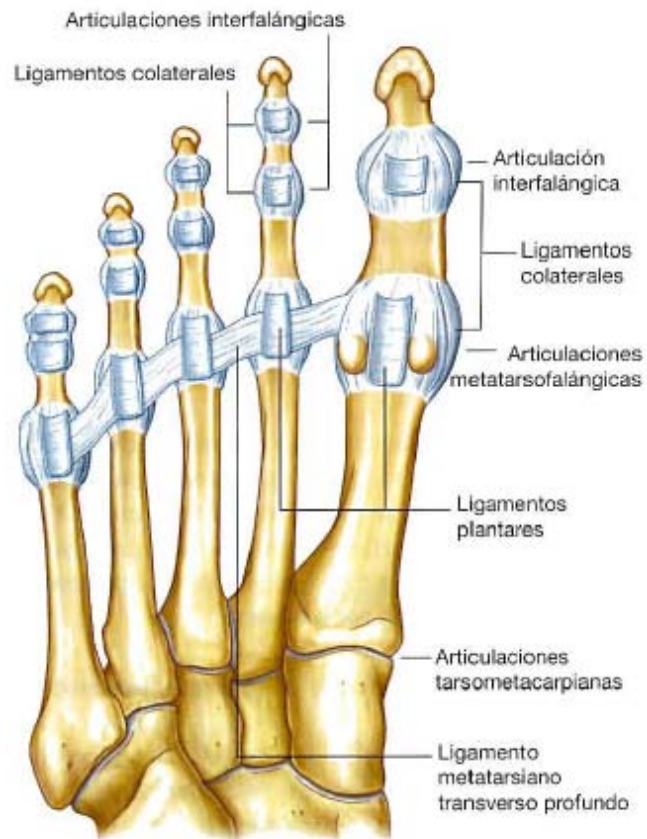


Figura 16. Articulaciones tarsometatarsianas, metatarsofalángicas e interfalángicas.

2.3. FASCIAS DEL PIE

En las fascias, o aponeurosis, del pie se pueden diferenciar las fascias plantares y las fascias dorsales.

2.3.1. FASCIAS DORSALES DEL PIE

En la cara dorsal del pie se halan tres capas de fascias (aponeurosis) conocidas como fascia superficial, fascia del pedio y fascia profunda o interósea dorsal.

La fascia dorsal superficial cubre los tendones extensores. Por arriba y por detrás se continúa con los tres ligamentos anulares de la garganta del pie. A las falanges se adhiere a los bordes externo e interno del pie, fusionándose con los bordes correspondientes de la fascia plantar.

La fascia del pedio es una lamina delgada, subyacente a los tendones extensores y que cubre los músculos extensores cortos, los vasos dorsales del pie y el nervio tibial anterior. Por la parte exteriores se fija en el borde externo del pie, mientras que en el interior se une a la fascia superficial a lo largo del tendón del extensor del dedo gordo.

La fascia profunda o interósea dorsal cubre la cara dorsal de los metatarsianos y de los músculos interóseos.

2.3.2. FASCIA PLANTAR DEL PIE

Existe una fascia plantar profunda y una fascia plantar superficial.

FASCIA PLANTAR SUPERFICIAL

Se encuentra debajo de la piel, de la cual la separa una gruesa capa de tejido adiposo y cubre los músculos superficiales de los tres grupos musculares de la región plantar. Al igual que la fascia superficial de la región palmar, se divide en tres partes: media, interna y externa, que corresponden a los tres grupos musculares medio, interno y externo de la planta del pie.

1. Fascia plantar media: es una lámina muy resistente, gruesa en la parte posterior y delgada en la parte anterior. Tiene forma triangular con el vértice posterior. La fascia plantar media se inserta por detrás en la tuberosidad del calcáneo y por delante termina a nivel de las articulaciones metatarso-falángicas. A los lados continúa con las fascias plantares interna y externa. La línea de unión de estas fascias corresponde a un surco longitudinal, más o menos profundo, ocupado por tejido adiposo. La fascia media está constituido por fibras longitudinales y transversales. Las longitudinales forman por detrás una lamina continua, la cual se divide por delante en cinco cintas pretendinosas, que presentan la misma disposición y el mismo modo de terminación que las de las aponeurosis palmar. Las fibras transversales están diseminadas a lo largo del espesor de la fascia, siendo más abundantes en la parte anterior. Forman a nivel de las articulaciones metatarso-falángicas un ligamento transversal superficial, y detrás de las comisuras interdigitales, un ligamento interdigital análogo al de la fascia plantar.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

2. **Fascia plantar externa e interna:** la fascia interna es delgada por detrás y gruesa por delante, mientras que la externa es gruesa por detrás y delgada por delante. Las dos se insertan por detrás en la tuberosidad correspondiente del calcáneo, a cada lado de la fascia media. Por delante se fusionan con las vainas tendinosas del primer y quinto dedo y con la cinta pretendinosa correspondiente a la fascia plantar media. Ambas dos se adhieren al borde lateral correspondiente del pie y continua con la fascia dorsal.

FASCIA PLANTAR PROFUNDA

Recubre los músculos interóseos y se extiende transversalmente del borde inferior del primer metatarsiano al borde inferior del quinto. Se confunde por delante con el ligamento intermetatarsiano profundo.

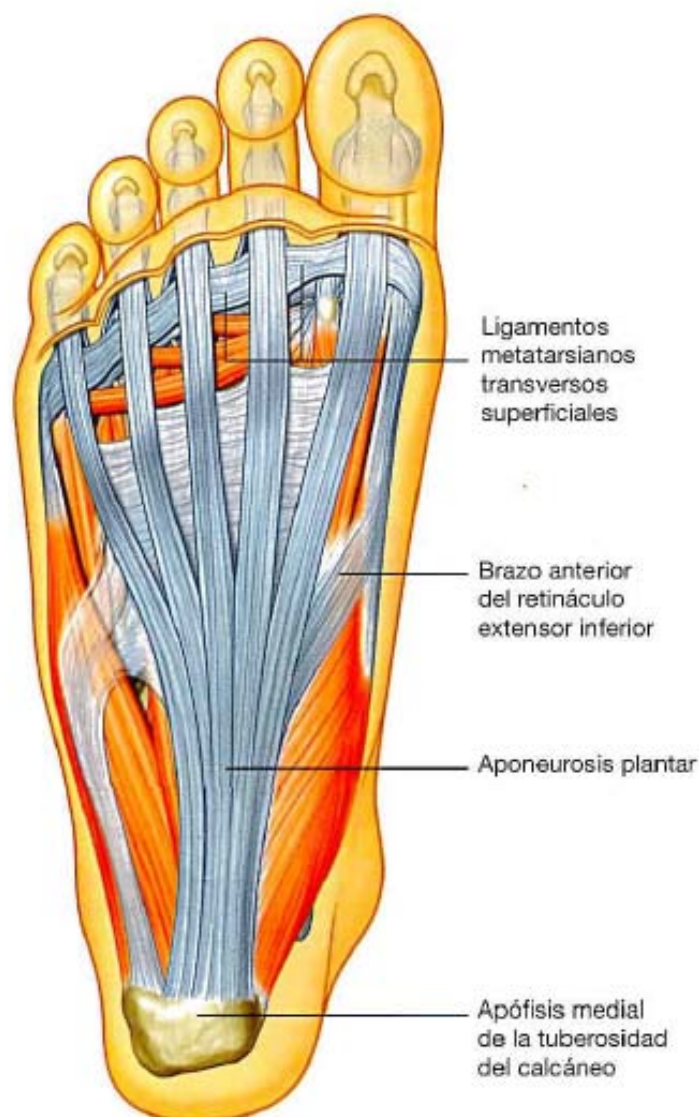


Fig. 6.109 Aponeurosis plantar.

Figura 17. Aponeurosis plantar

3. MODELOS DE MEF

3.1. PUNTO DE PARTIDA

Para realizar el estudio partiremos de dos modelos del pie en elementos finitos ya desarrollados. Los modelos están en constante desarrollo, de forma que se van perfeccionando para que los resultados sean cada vez más exactos. Los modelos del pie a partir del cual desarrollare el trabajo incluyen los siguientes elementos:

- Doce huesos del pie:
 - Calcáneo.
 - Astrágalo.
 - Navicular.
 - Cuboides.
 - Tres cuneiformes.
 - Cinco metatarsos.
 - Falanges (cuatro mediales, cinco distales y cinco proximales).
- Cartílagos:
 - Nueve cartílagos de las articulaciones interfalángicas.
 - Cinco cartílagos de las articulaciones metatarsofalángicas.
 - Cinco cartílagos interóseos de la articulación tarsometatarsiana.
 - Diez cartílagos interóseos de las articulaciones intertarsianas.
- Ligamentos:
 - Conjunto de tendones flexores plantares.
 - Conjunto de fascias plantares.
 - Conjunto de ligamentos interfalángicas.
 - Conjunto de ligamentos dorsales:
 - Ligamento calcáneo astragalino posterior.
 - Ligamento calcáneo astragalino interóseo.
 - Ligamento astrágalo escafoideo.
 - Ligamento tarsiano dorsal.
 - Haz calcáneo escafoideo del ligamento bipartito.
 - Haz calcáneo cuboideo del ligamento bipartito.
 - Ligamentos intertarsianos dorsales.
 - Ligamentos tarsometatarsianos dorsales.
 - Ligamento peroneo calcáneo.

ESTUDIO DE EXTRACCIÓN ÓSEA EN EL PRIMER METATARSO

3.1.1. MODELO DE PIE APOYADO

En este modelo, el peso del pie se encuentra apoyado sobre el calcáneo y los metatarsos, distribuyendo el peso entre estos dos grupos de huesos.

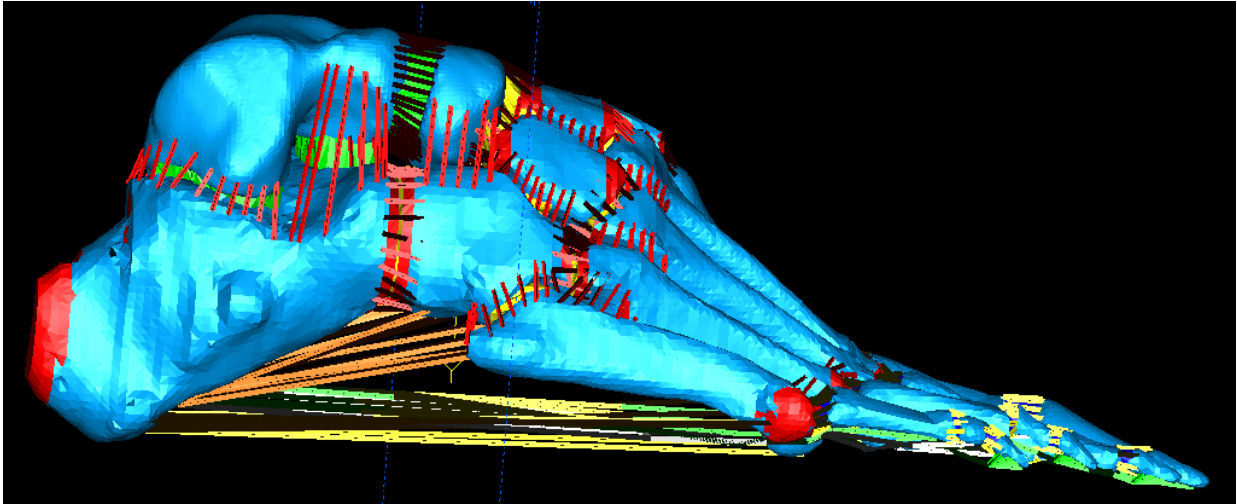


Figura 18. Vista medial del modelo de elementos finitos del pie apoyado

Se pretende realizar una extracción de tejido óseo en la cara plantar del primer metatarso. La extracción ósea será exclusivamente de tejido cortical, con unas dimensiones aproximadas de $15 \times 10 \text{ mm}^2$ y 2,5 mm de profundidad.

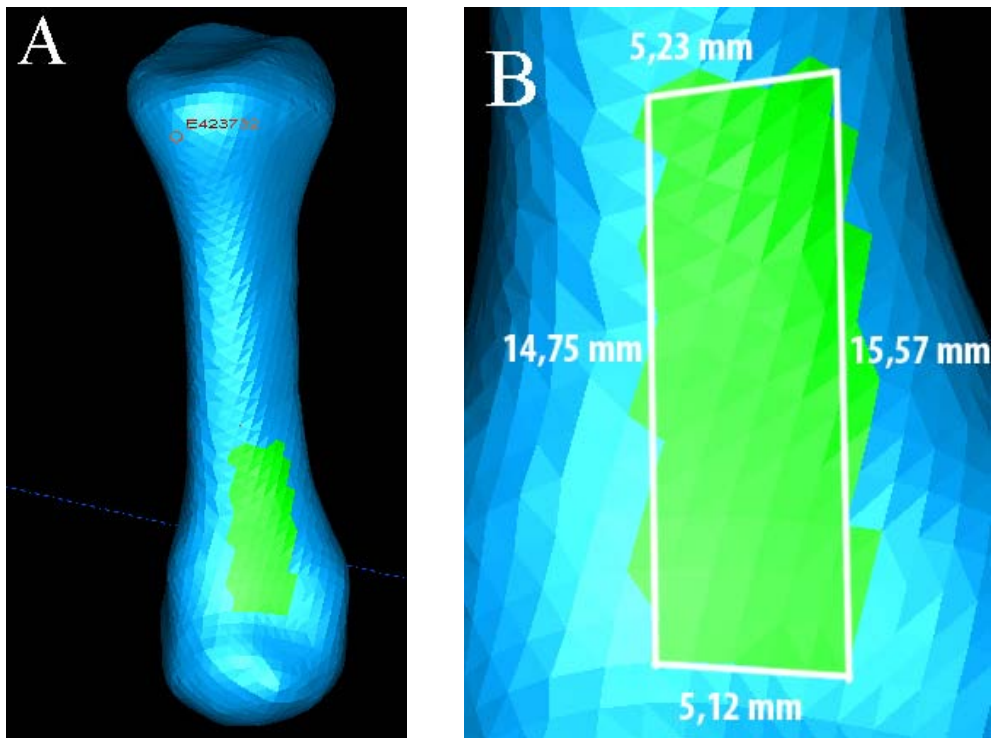


Figura 19. Vista dorsal del primer metatarso (A) y dimensiones de la extracción (B)

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

3.1.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS

La posición del pie en este modelo se encuentra en posición de puntillas. Todo el peso recae sobre los metatarsos y las falanges.

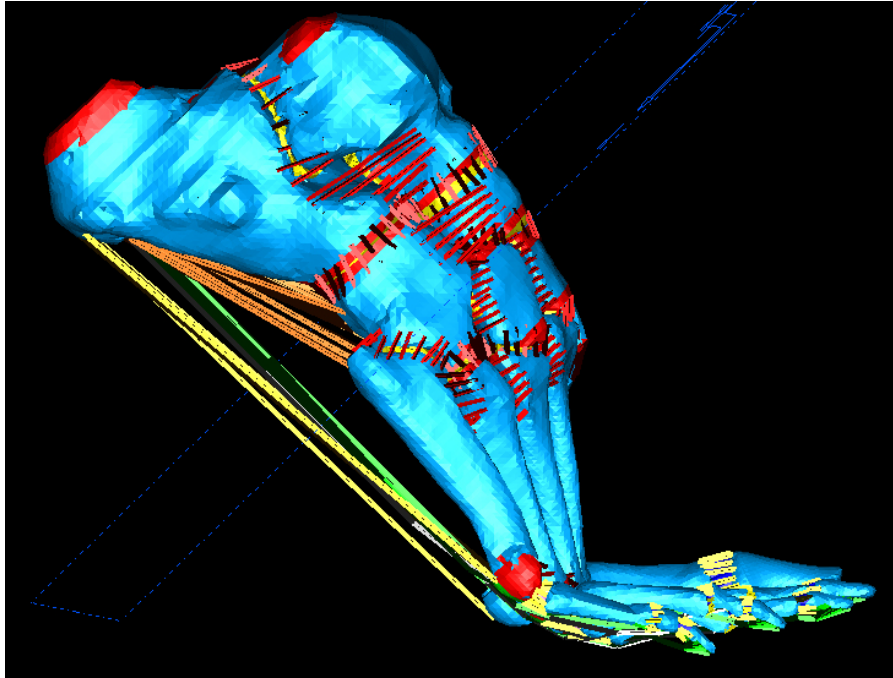


Figura 20. Vista medial del modelo de elementos finitos del pie puntillas

Se definirá la zona de extracción de forma que coincida con la definida en el modelo anterior para que los resultados de los análisis sean válidos, dado que ambos modelos representan el mismo pie en dos posiciones diferentes.

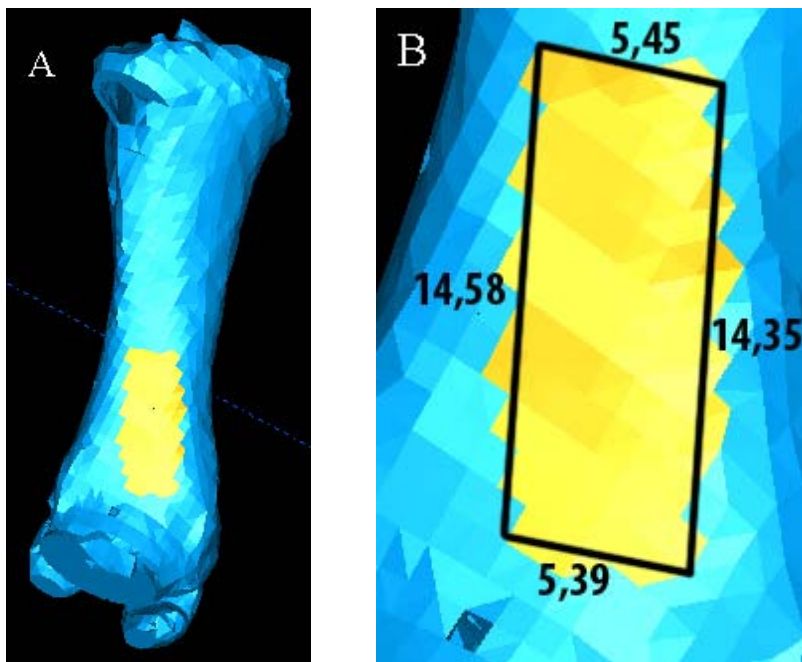


Figura 21. Vista dorsal del primer metatarso (A) y dimensiones de extracción (B)

3.2. TRABAJO EN I-DEAS

Los modelos del pie han sido desarrollados en I-DEAS (Integrated Design and Engineering Analysis Software), un software desarrollado para el análisis de elementos finitos. El mallado de elementos finitos ya ha sido realizado, por lo que solo es necesario modificarlo para adaptarlo nuestro caso.

En primer lugar hay que definir el volumen de hueso que se quiere extraer. En lugar de hacer un único bloque con el volumen de la extracción, se realizara la extracción en capas progresivas para poder estudiar el incremento de tensiones a medida en función del volumen extraído. A cada capa se le asignara un color específico para facilitar el visualizado y crear grupos con mayor facilidad (filtrando los elementos según el color).

Para ello, se seleccionan elementos superficiales hasta formar un área aproximada de $15 \times 10 \text{ mm}^2$ (véase Figura 21). Una vez seleccionados, se cambian de color. Para esta primera capa se ha elegido el color naranja-oro.

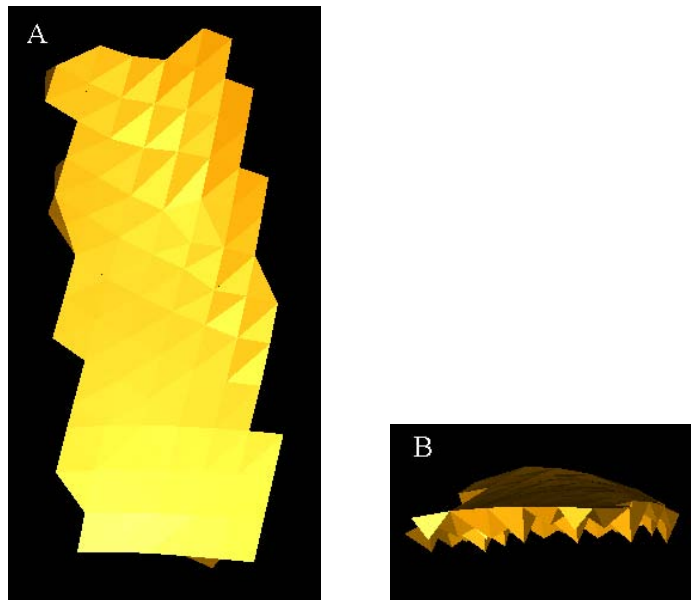


Figura 22. Vista de alzado (A) y de planta (B) de la capa de extracción

A continuación, se define la segunda capa. Para ello, se seleccionan los elementos de la primera capa y se les añade los nodos asociados. (Related to Element, seleccionamos los elementos, Display Options -> Display Selected: Filter-> related to Node). Ahora, se procede para conseguir los elementos asociados a dichos nodos, (Related to Node, seleccionamos los nodos, Display Options -> Display Selected: Filter-> related to Element), de forma que aparecen todos los elementos en contacto con los nodos de la primera capa de extracción. Manualmente se eliminan del grupo los elementos fuera del área de extracción (seleccionamos los elementos a eliminar y en ...) y se ocultan los elementos de la primera capa par quedarnos únicamente con la capa inferior. Para esta segunda capa se ha elegido el color verde oliva.

Llegados a este punto, se mide la distancia entre las puntas de la capa inferior y la superficie en el eje ortogonal. Como ninguna llega hasta los 2.5 mm de profundidad, se repite el paso anterior asignándole a esta nueva capa el color magenta claro.

Se vuelve a medir la distancia con esta nueva capa, y se comprueba que la distancia la profundidad es aproximadamente de 2.5 mm, la profundidad que se pretende alcanzar.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

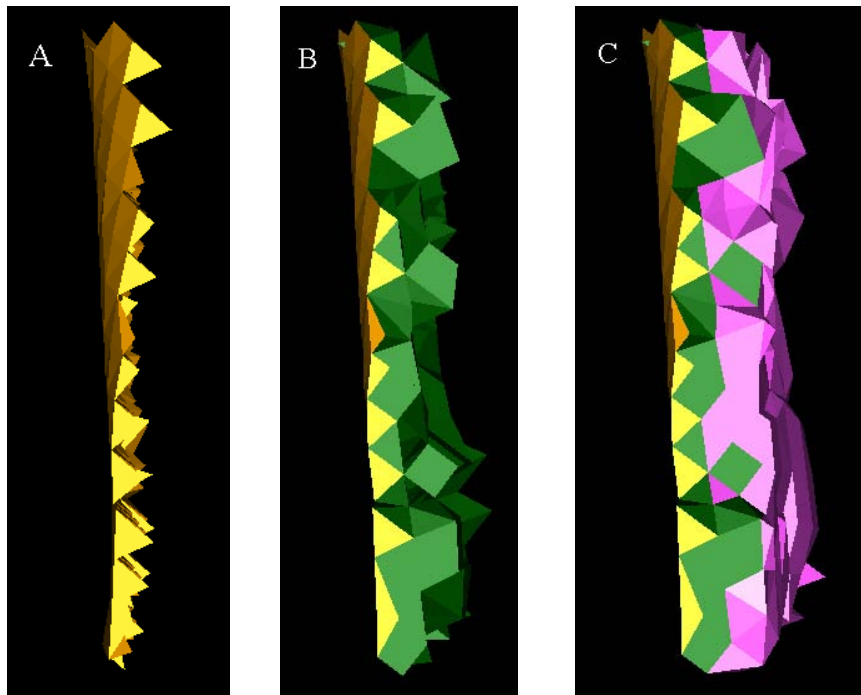


Figura 23. Zona de extracción. Una capa (A), dos capas (B) y tres capas (C)

Una vez definidas las capas de extracción, se crean los grupos con los elementos y nudos que se utilizarán posteriormente. Utilizando los comandos de visualización y gestión de grupo, se crearan diversos grupos atendiendo a las diferentes clasificaciones. En primer lugar, se define un grupo para los elementos con propiedades mecánicas similares. En este aspecto hay que destacar que el hueso posee zonas con diferente densidad de tejido óseo claramente diferenciadas:

- Hueso cortical: también llamado hueso compacto por su elevada densidad, compone la capa superficial de los huesos, en cuyo interior se halla el hueso esponjoso. Lo recubre el periostio, una membrana donde se agarran los huesos y tendones. El hueso cortical forma la parte más resistente de los huesos.
- Hueso esponjoso: el hueso esponjoso o trabecular constituye la parte interior de los huesos. Está formado por trabéculas, placas de estructura esponjosa en cuyo interior se haya la medula ósea, por lo que presenta una elevada porosidad y es de textura suave. Aporta estabilidad al hueso, y amortigua los impactos. Presenta una densidad y resistencia inferior a la del hueso cortical

Por lo tanto se definen dos grupos para los huesos: Uno que englobe el hueso cortical del esqueleto y otro con el hueso esponjoso del esqueleto del pie.

También se definirá un grupo que englobe el primer metatarso, para poder analizar por separado las tensiones en el hueso durante el análisis de resultados.

Finalmente, se crean tres grupos con las capas progresivas de extracción, para estudiar las tensiones en el metatarso y desplazamientos a medida que se eliminan capas progresivamente del modelo.

El siguiente paso es exportar el fichero para abrirlo en Abaqus. Seleccionamos la opción de Abaqus File Exporter y en la opción Elset/NsetMappingse elige los grupos de nodos y elementos que queremos exportar.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

3.2.1. MODELO DE PIE APOYADO

Aunque se vayan a exportar los mismos grupos de elementos para ambos modelos, dado que cada modelo tiene condiciones de apoyo distintas, los grupos de nodos serán particulares para cada modelo, dado que será en estos grupos de nodos donde se aplicaran las condiciones de contorno y de cargas específicas a cada modelo. A continuación se explican brevemente los grupos de nodos a exportar:

- CARGATALONAQUILES: nodos donde se aplicara la carga sobre el talón.
- APOYOTALON: puntos de contacto del talón con el suelo.
- APOYOMETA: nodos de contacto de los metatarsos con el suelo.
- NODOSCARGASUPERIOR: nodos donde se aplicara la carga sobre el astrágalo.

3.2.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS

En este modelo se van a definir condiciones de carga y de contorno necesarias en el modelo de pie puntillas. Para este modelo son necesarios los siguientes grupos:

- CARGATALONAQUILES: nodos donde se aplicara la carga sobre el talón.
- APOYOMETA: nodos de contacto de los metatarsos con el suelo.
- NODOSHORIZONTAL: nodos de contacto de las falanges con el suelo.
- NODOSAPOYO: nodos de contacto de las falanges con el suelo.
- NODOPARACARGA70: nodos donde se aplica la carga sobre el astrágalo.
- NODOSFLEXORES1: nodos que forman la superficie de contacto del suelo que forman los flexores.

4. MATERIALES Y PROPIEDADES

Para realizar la simulación es necesario conocer y definir las propiedades mecánicas de los diferentes materiales caracterizados en el pie. Para cada material será necesario definir las siguientes propiedades de rigidez: Modulo elástico y coeficiente de Poisson.

En lugar de asignar a cada elemento del pie una propiedad mecánica específica, se pueden asignar propiedades a grupos de elementos. Como anteriormente se han creado diversos grupos que reúnen los elementos con características comunes, solo hay que asignar a estos grupos las propiedades mecánicas del tipo de elemento que contienen. Para establecer las propiedades mecánicas, se han utilizado los valores asignados en proyectos anteriores.

A continuación, se detallan los grupos de materiales que conforman el pie y el valor del modulo elástico y el coeficiente de Poisson que se les ha asignado. Aunque se ha trabajado con dos modelos distintos del pie, ambos modelos comparten los mismos grupos de elementos, por lo que estas propiedades se definirán en ambos ficheros.

4.1. ESPONJOSO

Este grupo engloba el tejido de hueso esponjoso presente en los huesos del pie. Como ya se ha explicado, el hueso esponjoso forma la parte interior de los huesos y presenta una baja densidad. Se han asignado las siguientes propiedades al hueso esponjoso:

- Material isótropo elástico-lineal.
- Modulo de elasticidad de 700 MPa.
- Coeficiente de Poisson de 0,3.

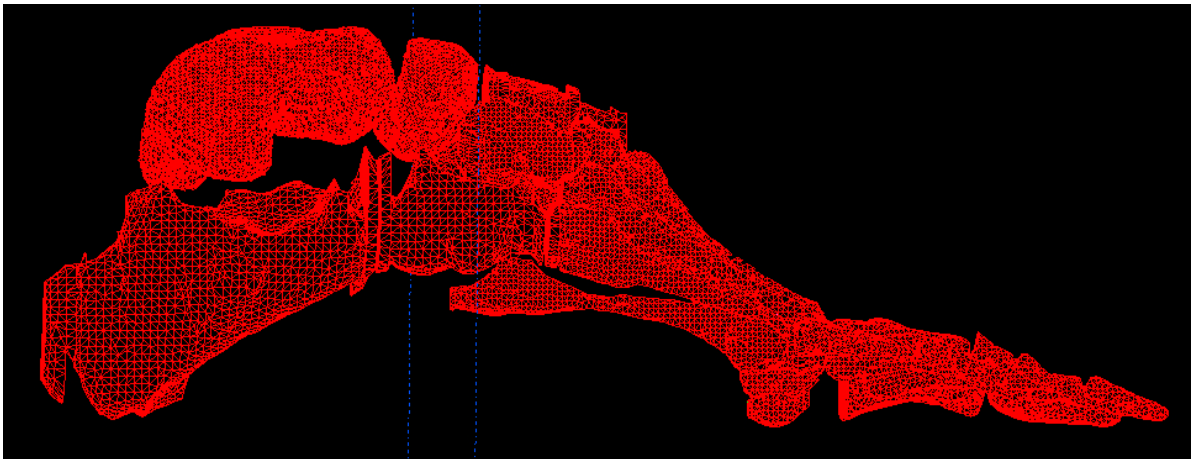


Figura 24. Grupo Esponjoso del modelo de Pie Apoyado

4.2. CORTICAL

En este grupo se encuadra el tejido cortical del hueso que se encuentra en los huesos del pie. El tejido cortical conforma la superficie de los huesos, siendo de elevada resistencia. Las propiedades asignadas al hueso cortical son:

- Material isótropo elástico-lineal.
- Modulo de elasticidad de 17000 MPa.
- Coeficiente de Poisson de 0,3.

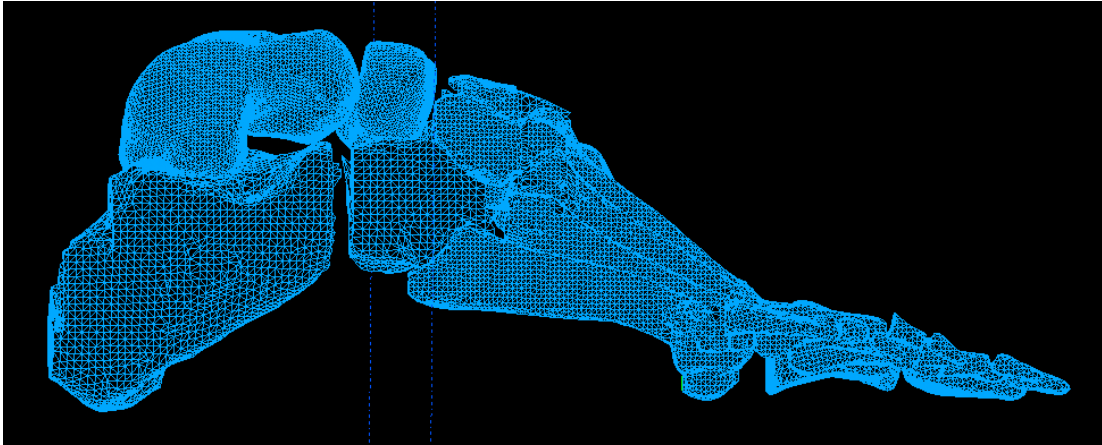


Figura 25. Grupo cortical del modelo de Pie Apoyado

4.3. CARTILAGO

El tejido cartilaginoso es un tejido conectivo formado por células condrógenas, fibras colágenas elásticas y matriz extracelular. Los cartílagos recubren las terminaciones óseas y tienen como objeto acomodar las superficies de los huesos con las articulaciones, amortiguar golpes al caminar y prevenir el desgaste de las articulaciones. Propiedades de los cartílagos:

- Material isótropo elástico-lineal isótropo.
- Modulo de elasticidad de 10 MPa.
- Coeficiente de Poisson de 0,4.

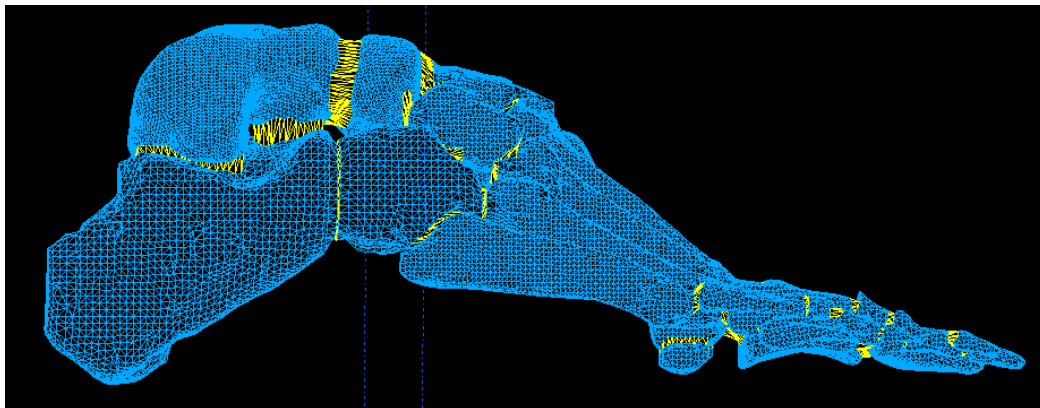


Figura 26. Grupo cartílagos (amarillo) del modelo de Pie Apoyado

4.4. LIGAMENTOS

Los ligamentos son estructuras en forma de banda, compuestos por fibras resistentes que conectan los tejidos que unen a los huesos en las articulaciones. Confieren estabilidad a la articulación y permiten el movimiento de los huesos.

En los modelos de elementos finitos se han definido distintos tipos de ligamentos con sus propiedades mecánicas particulares. Al ser estructuras en forma de banda, se han definido como elementos barra, por lo que cada clase de ligamentos tiene una sección de barra específica.

4.4.1. LIGAMENTOS FINOS

Unen cada hueso del pie con los huesos que le rodean. Son los elementos más débiles. Se les ha asignado las siguientes propiedades:

- Elementos barra con una sección de $0,042 \text{ mm}^2$
- Material isótropo elástico-lineal isótropo.
- Modulo de elasticidad de 10 MPa.
- Coeficiente de Poisson de 0,4.

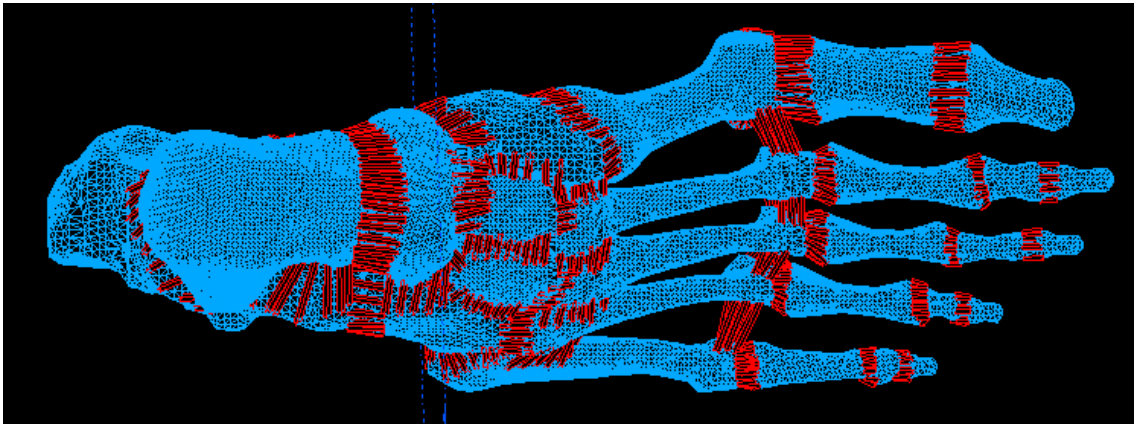


Figura 27. Grupo ligamentos finos (rojo) del modelo de Pie Apoyado

4.4.2. LIGAMENTOS PLANTARES

Ligamentos de gran resistencia que soportan las cargas a las que se somete el pie. Se encuentran en el interior de la bóveda plantar, y tienen las siguientes propiedades:

- Elementos barra con una sección de $7,27 \text{ mm}^2$
- Material isótropo elástico-lineal isótropo.
- Modulo de elasticidad de 350 MPa.
- Coeficiente de Poisson de 0,4.

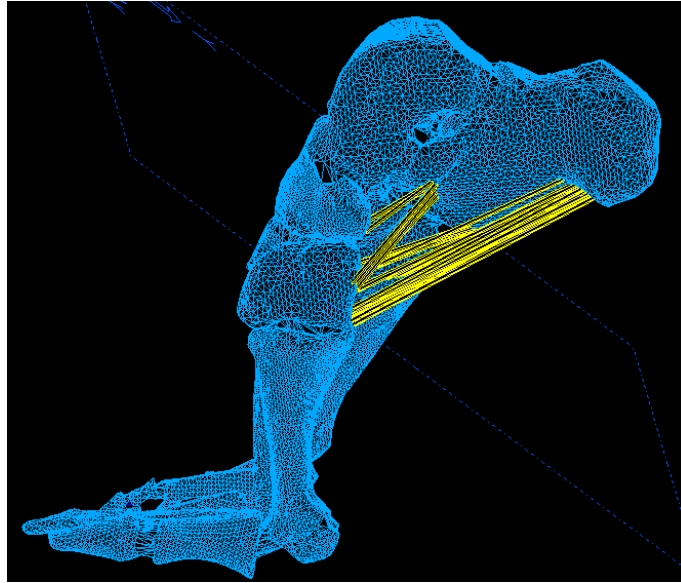


Figura 28. Grupo ligamentos plantares (amarillo) del modelo Pie Puntillas

4.4.3. FASCIA PLANTAR

La fascia plantar está formado por una banda de varias capas de tejido fibroso y tiene como objeto mantener los arcos longitudinales, y proteger tendones y músculos. Las propiedades de la fascia plantar son:

- Elementos barra con una sección de $7,27 \text{ mm}^2$
- Material isótropo elástico-lineal isótropo.
- Modulo de elasticidad de 350 MPa.
- Coeficiente de Poisson de 0,4.

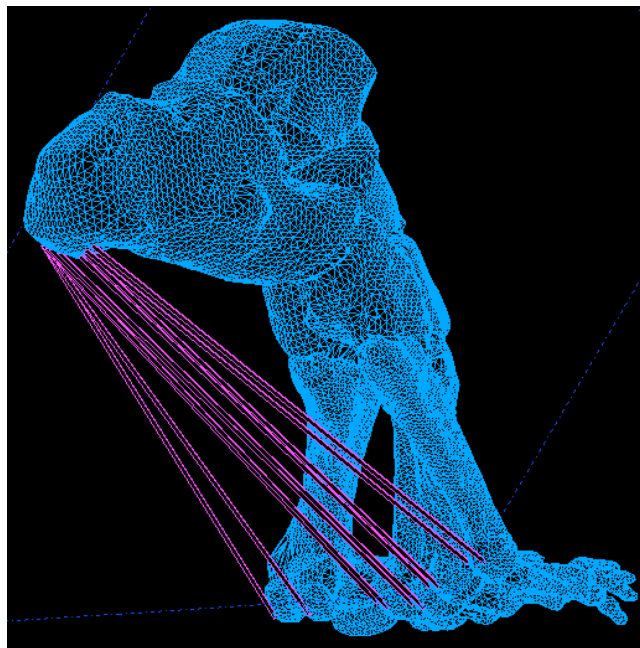


Figura 29. Grupo ligamentos fascia plantar (violeta) del modelo Pie Puntillas

5. CONDICIONES DE APOYO

Dado que los modelos representan un pie humano en movimiento, hay que comprender el proceso de caminar y la secuencia del movimiento del pie. Para poder identificar las condiciones de apoyo hay que determinar con exactitud en qué fase se encuentra los dos modelos en los que hemos trabajado.

5.1. CICLO DE LA MARCHA HUMANA

Las cargas del pie no son constantes cuando se camina, sino que se modifican tanto en valor y dirección como en lugar de aplicación, por lo que conviene dividir el proceso de caminar en varias fases. Se han realizado varios estudios para dividir el proceso:

1. **Initial-Contact:** contacto inicial del pie con el suelo. Es el momento en el que el talón o calcáneo es la única parte del pie que se apoya. Recibe, por tanto, todo el peso del cuerpo.

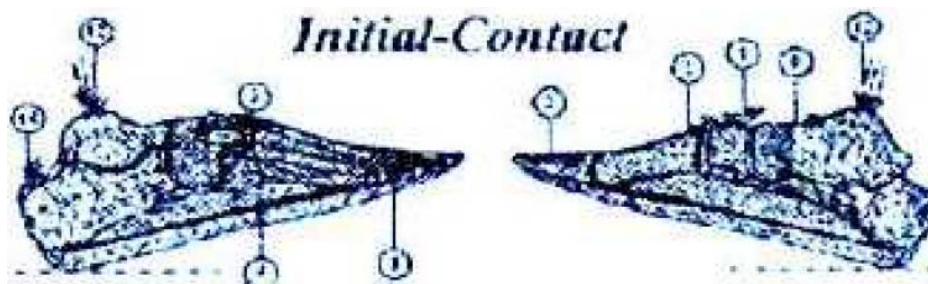


Figura 30. Primera fase de la marcha

2. **Heel-Strike:** momento en el que la articulación del tobillo gira hacia adelante con la intención de hacer contactar las almohadillas de las falanges con el suelo, pero sin llegar al contacto. El calcáneo es la única superficie que apoya con el suelo.



Figura 31. Segunda fase de la marcha

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

3. **Midstance:** En esta posición la planta del pie se apoya totalmente sobre el suelo. La carga sobre el pie es equivalente al peso corporal.

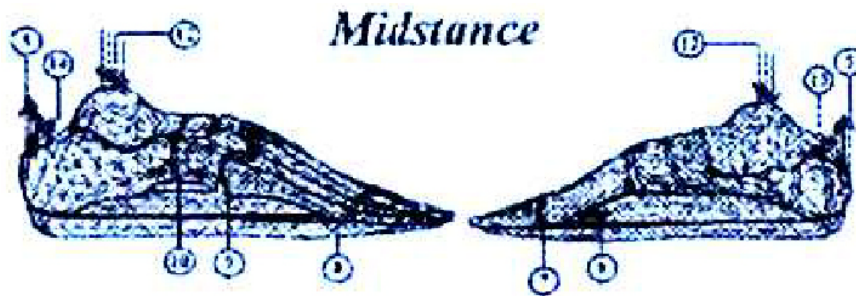


Figura 32. Tercera fase de la marcha

4. **Forefoot-Contact:** Estado en el cual el tendón de Aquiles ejerce la fuerza necesaria para levantar el talón, por lo que deja de estar en contacto con el suelo.

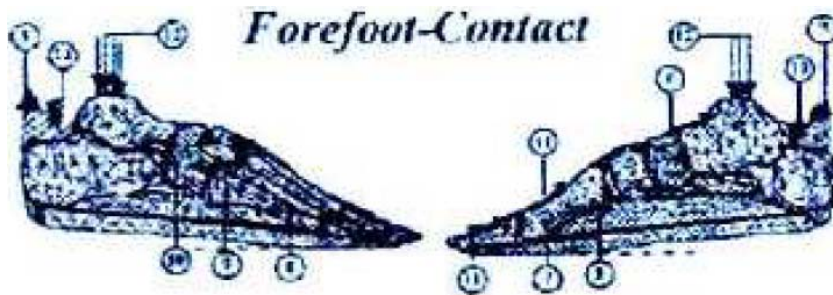


Figura 33. Cuarta fase de la marcha

5. **Push-Off:** caso inmediato al estado forefoot-Contact, donde el talón se encuentra más elevado. El primer metatarso forma un ángulo mayor con el suelo que en la fase anterior. Aunque el cambio entre la fase anterior y la actual es inexacta dada la diferencia que existe entre cada pie, se puede considerar que un sujeto se encuentra en esta fase cuando la carga sobre el pie cae ligeramente a un valor aproximado de cuatro veces el peso corporal.



Figura 34. Quinta fase de la marcha

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

6. **Toe-Off:** el primer metatarso forma con el suelo un grado de noventa grados o superior, hasta que el contacto entre ellos desaparece por completo. La superficie de apoyo con el suelo es menor que en cualquiera de las demás fases y corresponde a la superficie inferior de los dos primeros dedos, hasta que estos dejan de tener contacto. Por lo expuesto, la carga que soporta el pie va disminuyendo hasta llegar a anularse cuando desaparece el contacto del pie con el suelo

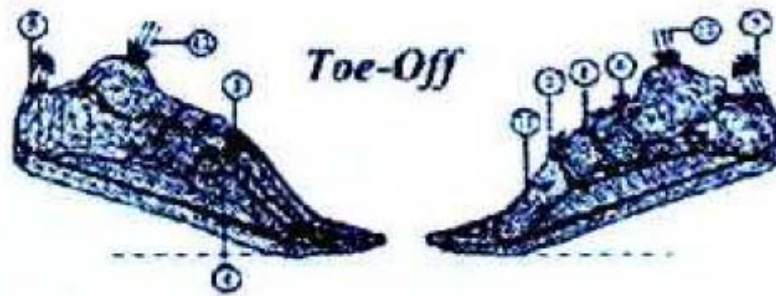


Figura 35. Sexta fase de la marcha

En este proyecto, el modelo designado como Pie Apoyado se corresponde a la posición tercera del tercer momento de apoyo del ciclo de la marcha humana, Midstance.

El modelo de Pie Puntillas se encuentra en una posición intermedia entre Push Off y Toe Off, en el punto en que el primer metatarso forma un ángulo de 90° con la primera falange. La posición coincide con tercer momento del ciclo de estancia de la marcha humana Tercer Rocker.

Por tanto, para comprender un poco mejor el proceso del caminar humano, conviene detallar la marcha humana de acuerdo con los tres momentos de Rocker.

Ciclo de la marcha humana Rocker

Además de la división en seis fases de la marcha humana, como la expuesta anteriormente, también es posible dividir el proceso en tres momentos del ciclo. Esta división está muy extendida en el ámbito de la medicina y se aproxima mejor a nuestro modelo de Pie Puntillas. Los momentos del ciclo son:

7. **Primer Rocker:** es el primer momento del ciclo. Abarca desde el contacto del talón con el suelo (Initial contact) hasta el momento previo del contacto total de la planta del pie de adelante a atrás.
8. **Segundo Rocker:** el segundo momento del ciclo comienza en el momento en que el pie está totalmente apoyado sobre el suelo (Midstance) y llega hasta el instante anterior a levantar el talón.
9. **Tercer Rocker:** última fase del ciclo, empieza en el momento en que el talón se despegaba del suelo (Forefoot-Contact) y se prolonga hasta que el pie queda totalmente en el aire (instante anterior inmediato al Toe-Off).

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

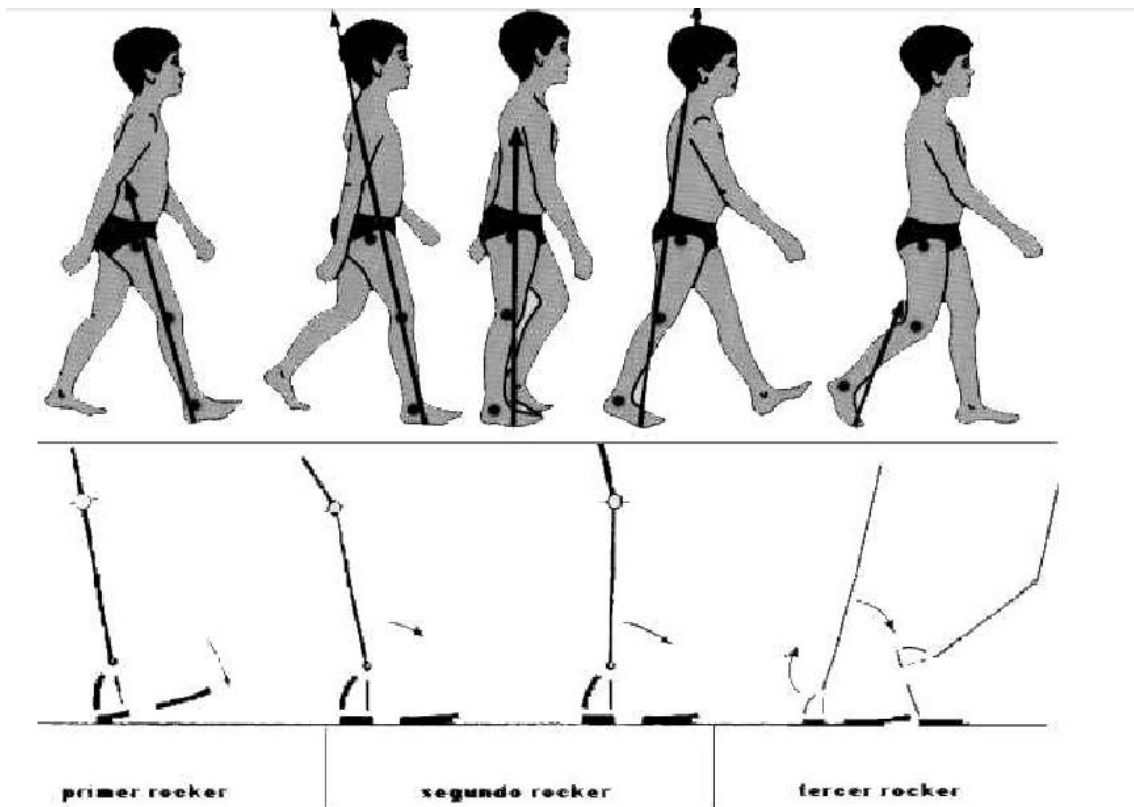


Figura 36. Momentos del ciclo de la marcha

5.2. CONDICIONES DE CONTORNO

5.2.1. MODELO DE PIE APOYADO

Como ya se ha mencionado, en el modelo de Pie Apoyado, la posición del pie se halla en la tercera fase, Midstance. En esta fase, los elementos del pie en contacto con el suelo son el calcáneo, los metatarsianos, y los sesamoideos del primero.

Por ello, se definen las siguientes condiciones de contorno para el pie:

- Calcáneo: se crea un grupo de nodos que contenga los nodos en contacto con el suelo y se restringe el movimiento del grupo en los tres ejes de coordenadas.
- Metatarsianos y sesamoideos: se crea un grupo de nodos que contenga los nodos en contacto con el suelo y se restringe el movimiento del grupo en el eje perpendicular al suelo.

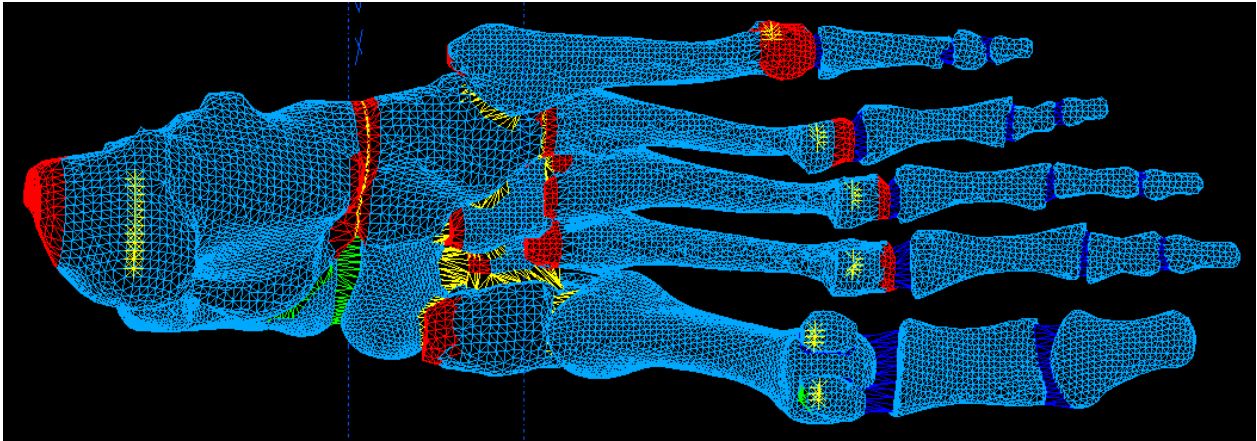


Figura 37. Nodos de contacto con el suelo (amarillo)

5.2.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS

En este modelo, el pie se encuentra entre las fases quinta y sexta, Push-Off y Toe-Off, en el momento en que las falanges realizan el contacto con el suelo. En el modelo esta simulado el tercer momento de apoyo del ciclo de la marcha en una situación estática, sin tomar en consideración los momentos de giro causados por el movimiento ni rozamientos con el suelo.

En este caso, el contacto con el suelo se produce por las falanges y no con los metatarsianos como en el modelo anterior. Se aplican las siguientes condiciones de apoyo:

- Calcáneo: Se restringe el movimiento en los tres ejes de coordenadas de los nodos considerados en el modelo anterior. De esta forma se evita que el talón se desplace imitando la tarea del tendón de Aquiles.
- Falanges: el contacto del pie con el suelo en el estado donde no existe variación de longitud del segundo metatarsiano se produce con la primera y segunda falange, que se consideran apoyos empotrados. Las otras tres falanges van perdiendo contacto con el suelo, por lo que se permite libertad de movimientos en el plano paralelo al suelo. Por lo tanto, únicamente se restringe el movimiento en el eje perpendicular al suelo.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

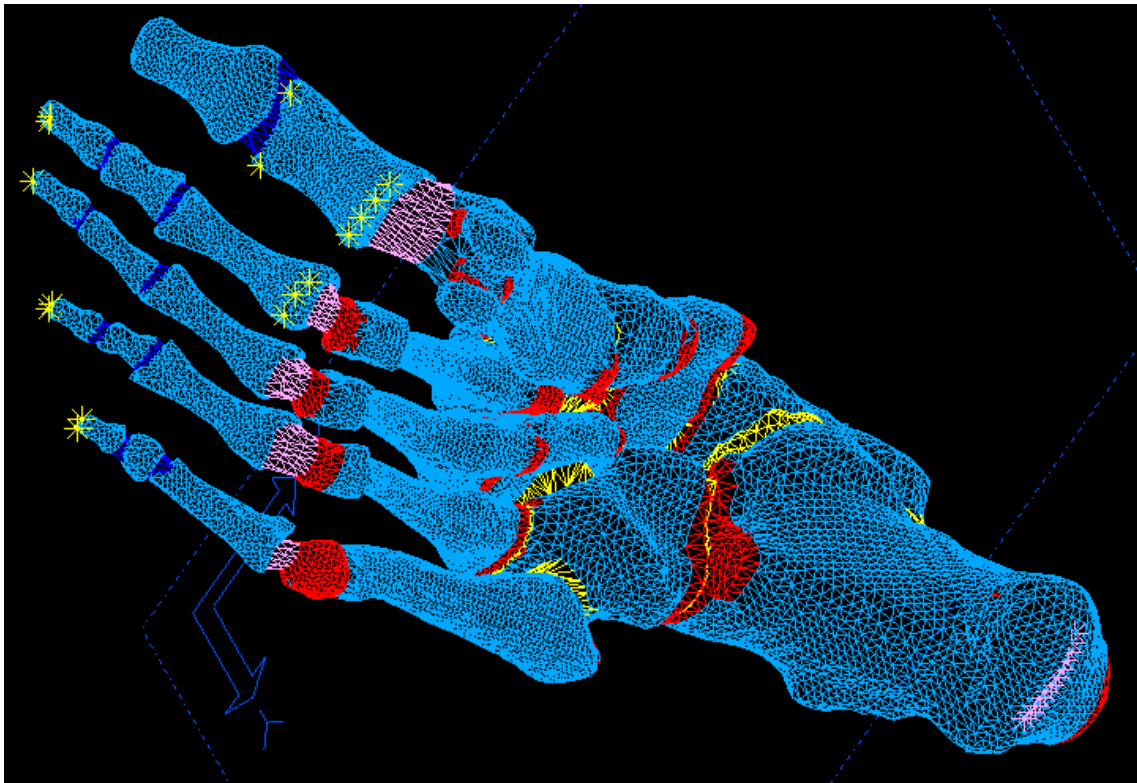


Figura 38. Nodos de contacto (amarillo) y nodos del talón fijos (lila)

6. CARGAS

6.1. MODELO DE PIE APOYADO

Como hemos visto en el capítulo de anatomía, el astrágalo soporta el peso del cuerpo. Esta fuerza es transmitida al astrágalo por la tibia y el peroné, por lo que las cargas se aplicaran en las superficies de contacto entre el astrágalo, y la tibia y el peroné.

Para la simulación de los modelos, hemos tomado como hipótesis que el peso de la persona es de 60 kg, repartiéndose a partes iguales entre los dos pies, por lo que la carga aplicada en cada pie corresponde a un valor de 300 Newton. Esta carga se distribuye de forma uniforme entre todos los nodos del astrágalo en contacto con la tibia y el peroné.

Cuando se aplique esta carga sobre los nudos, hay que considerar una inclinación de 10° debido a la inclinación de la tibia y el peroné en esta fase de la marcha.

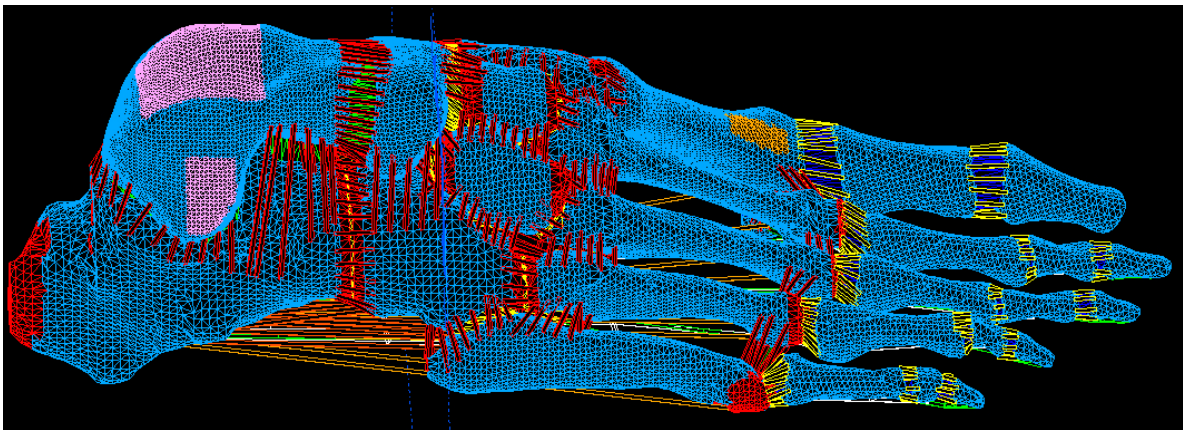


Figura 39. Nodos donde se aplica la carga del peso del cuerpo (lila)

Por su lado, el calcáneo también ejerce una fuerza de sentido contrario y de un valor aproximado a la mitad de la fuerza ejercida sobre el astrágalo. Esta fuerza tiene lugar como resultado de la acción del tendón de Aquiles. Así, hay que distribuir 150 N, con la misma inclinación de 10° sobre los nudos que representan el contacto entre el calcáneo y el tendón de Aquiles.

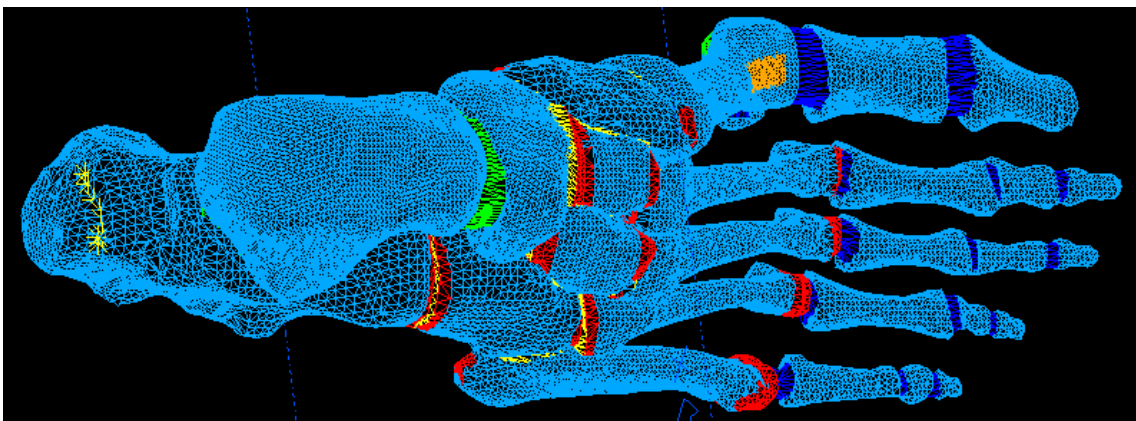


Figura 40. Nodos donde se aplica la carga del talón de Aquiles (amarillo)

6.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS

El modelo de Pie Puntillas se corresponde con el instante en que el pie ha recorrido el 85% del ciclo de la marcha. La carga correspondiente al peso del cuerpo se aplica exclusivamente sobre el astrágalo.

La carga sobre el pie disminuye a partir del instante en que se eleva el talón hasta anularse completamente cuando el pie queda totalmente suspendido en el aire. En este punto del ciclo de la marcha, la carga perpendicular al astrágalo equivale a tres veces el peso corporal, y la fuerza tangencial a 0.2 veces el peso. Como en el caso anterior, tomamos como hipótesis que la persona estudiada tiene un peso de 60 kg, por lo que el peso equivalente total es de 180,5 kg. En este caso, todo el peso recae sobre el pie, por lo que se debe aplicar una carga de 1805 N distribuida uniformemente sobre los nudos de contacto del astrágalo con la tibia y el peroné.

Debido al ciclo de la marcha, en esta fase hay que tener en consideración una inclinación de 20° sobre la perpendicular a la superficie de contacto.

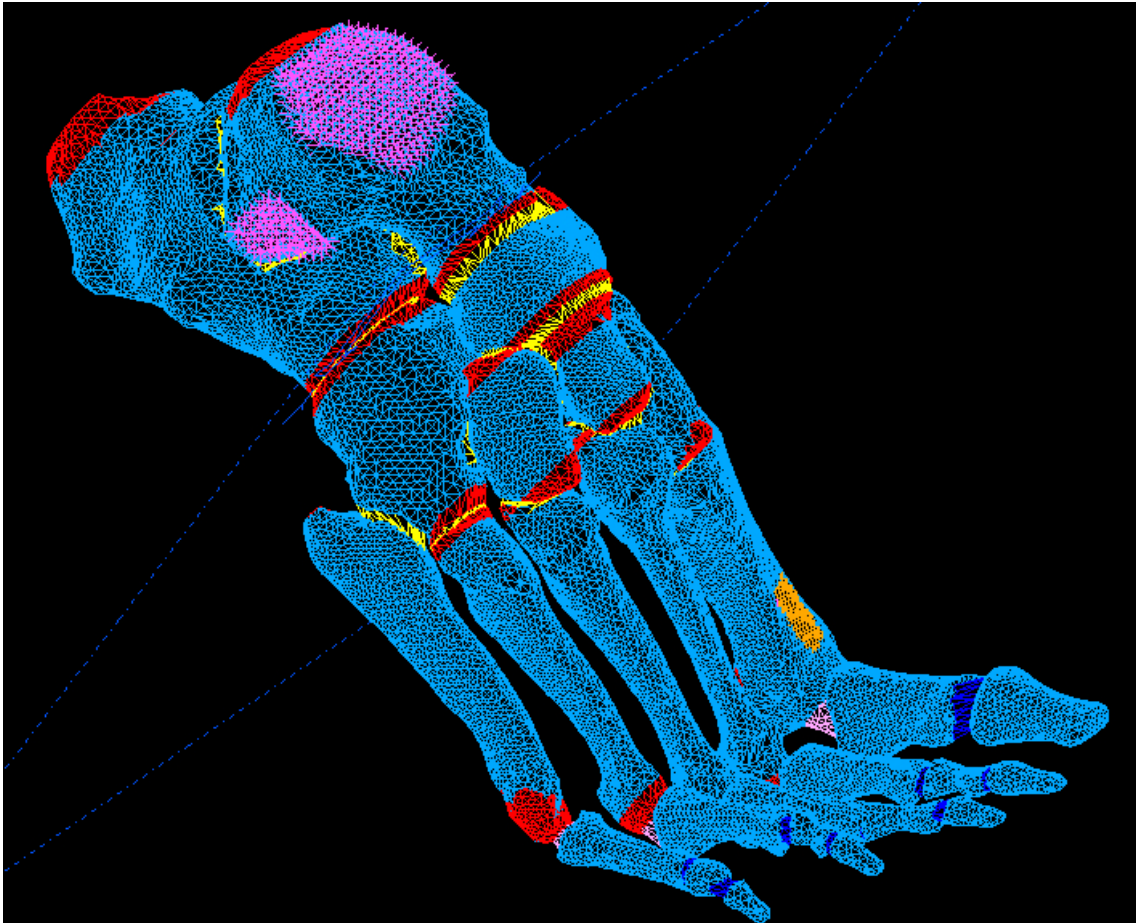
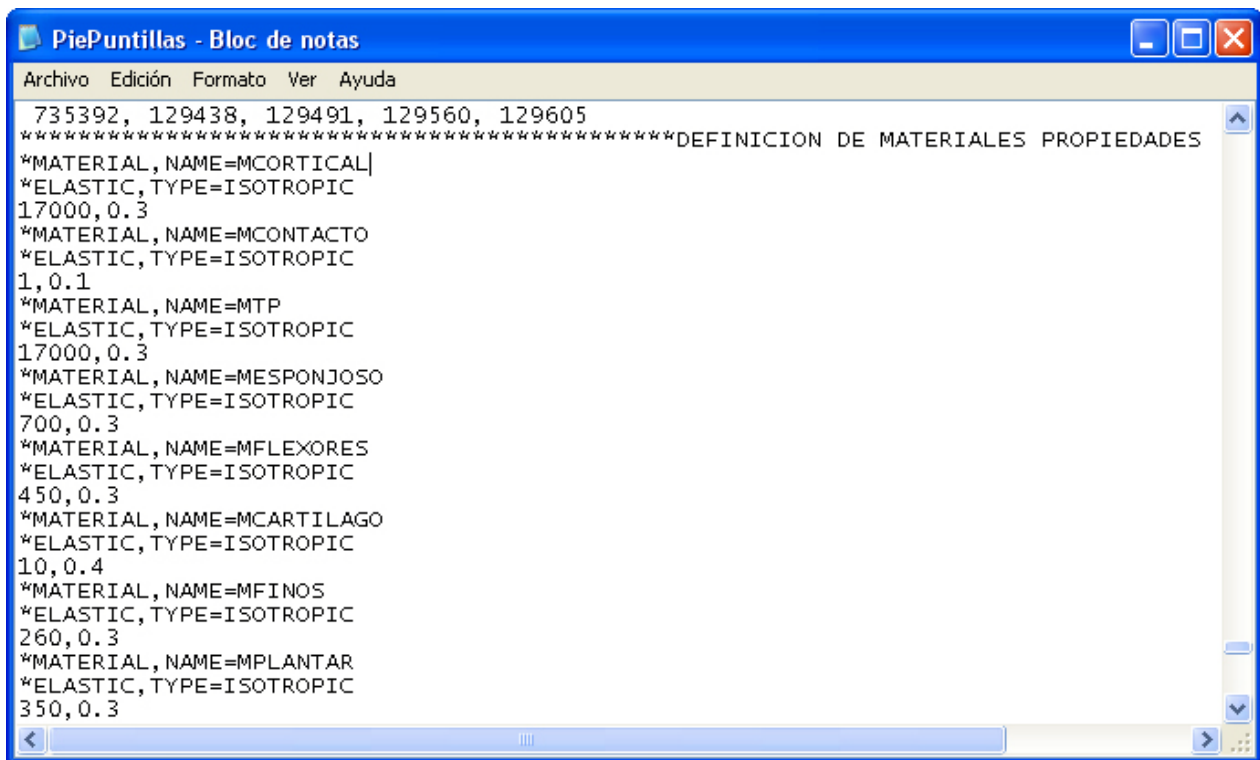


Figura 41. Nodos donde se aplica la carga del peso del cuerpo (violeta)

7. ANALISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se ejecutara la simulación de los modelos y analizaremos los resultados obtenidos. Utilizaremos el software Abaqus, un programa de cálculo por elementos finitos e ingeniería asistida por ordenador. Para este proyecto, utilizaremos una aplicación de Abaqus, Abaqus CAE. Por tanto, lanzaremos en Abaqus los archivos INP exportados de I-DEAS.

En primer lugar, se asignaran las propiedades de los materiales. Para ello, se deberán definir las propiedades en los ficheros, asignando un nombre a cada material. Esta definición se inserta justo después de la definición de los elementos y nodos del modelo.

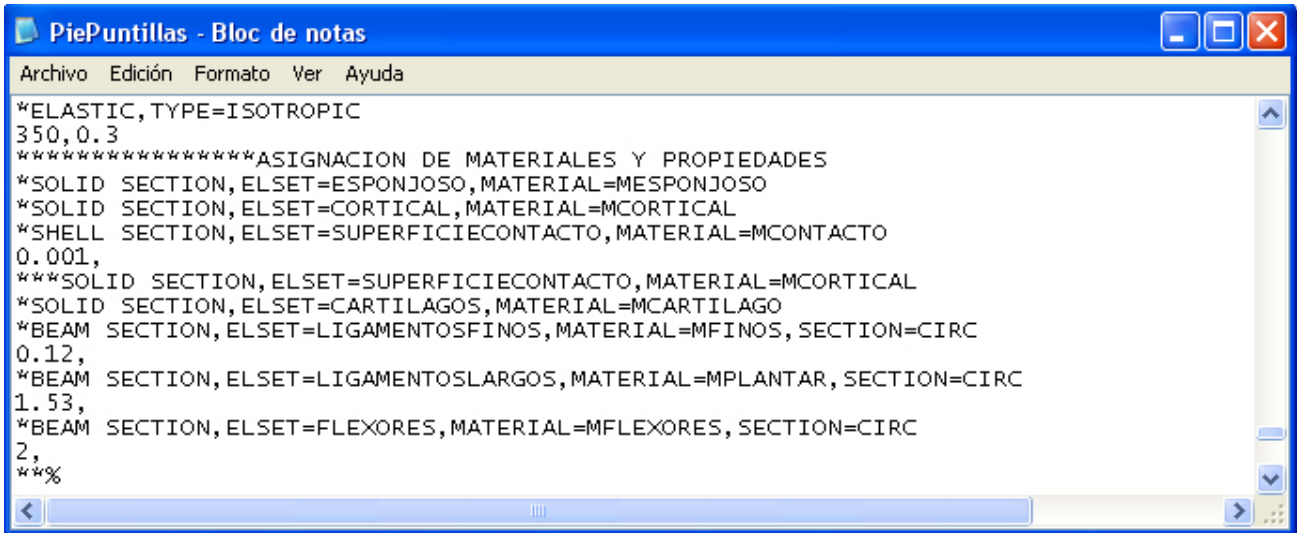


```
735392, 129438, 129491, 129560, 129605
*****DEFINICION DE MATERIALES PROPIEDADES
*MATERIAL, NAME=MCORTICAL|
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
17000, 0.3
*MATERIAL, NAME=MCONTACTO
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
1, 0.1
*MATERIAL, NAME=MTP
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
17000, 0.3
*MATERIAL, NAME=MESPONJOSO
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
700, 0.3
*MATERIAL, NAME=MFLEXORES
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
450, 0.3
*MATERIAL, NAME=MCARTILAGO
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
10, 0.4
*MATERIAL, NAME=MFINOS
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
260, 0.3
*MATERIAL, NAME=MPLANTAR
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
350, 0.3
```

Figura 42. Definición de las propiedades de los materiales

A continuación, asignaremos a cada elemento sus propiedades correspondientes. Para ello, en I-DEAS, se crearon grupos con elementos de propiedades similares. En este paso, asignaremos a cada grupo de elementos el material correspondiente que se han definido en el paso anterior. La asignación de propiedades a los grupos de elemento se inserta a continuación de la definición de los materiales.

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

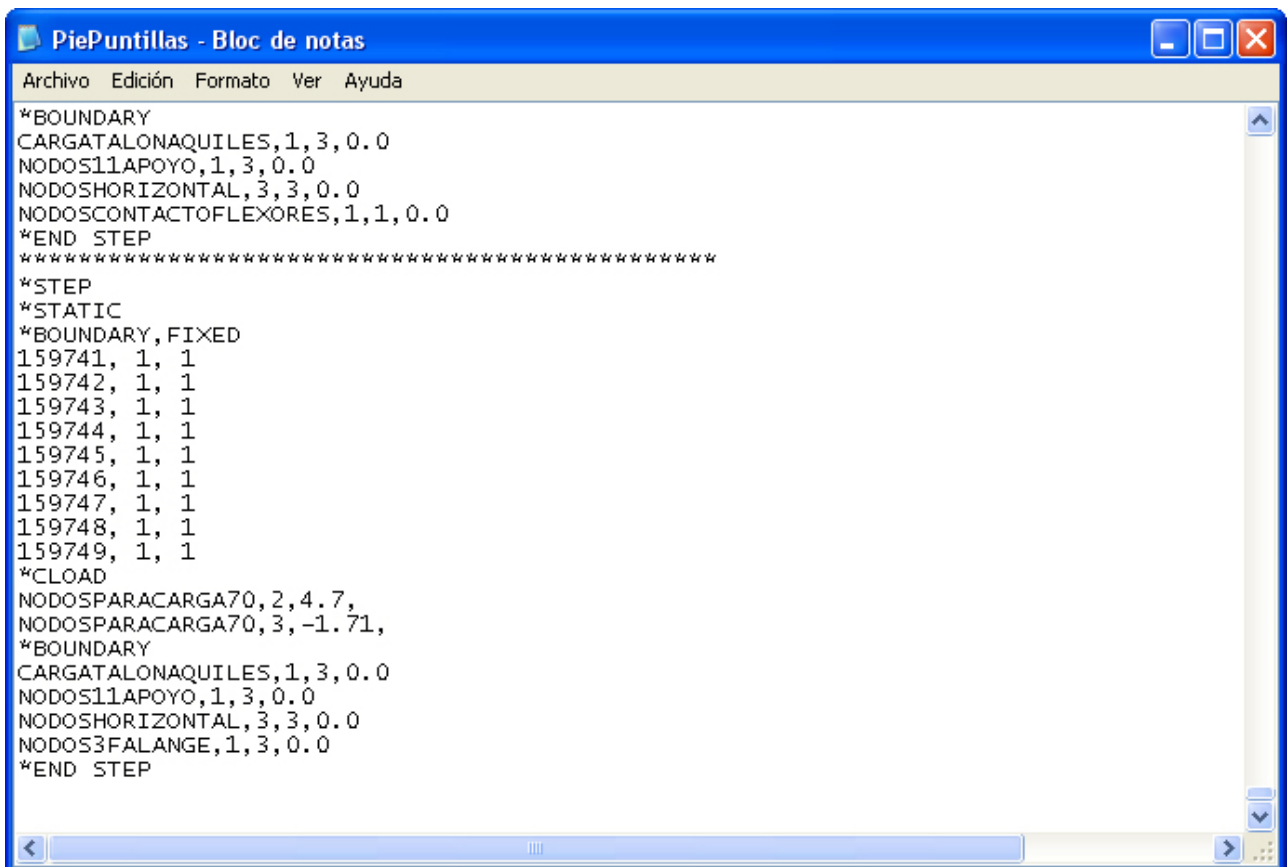


```
PiePuntillas - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
350, 0.3
*****ASIGNACION DE MATERIALES Y PROPIEDADES
*SOLID SECTION, ELSET=ESPONJOSO, MATERIAL=MESPONJOSO
*SOLID SECTION, ELSET=CORTICAL, MATERIAL=MCORTICAL
*SHELL SECTION, ELSET=SUPERFICIECONTACTO, MATERIAL=MCONTACTO
0.001,
***SOLID SECTION, ELSET=SUPERFICIECONTACTO, MATERIAL=MCORTICAL
*SOLID SECTION, ELSET=CARTILAGOS, MATERIAL=MCARTILAGO
*BEAM SECTION, ELSET=LIGAMENTOSFINOS, MATERIAL=MFINOS, SECTION=CIRC
0.12,
*BEAM SECTION, ELSET=LIGAMENTOSLARGOS, MATERIAL=MPLANTAR, SECTION=CIRC
1.53,
*BEAM SECTION, ELSET=FLEXORES, MATERIAL=MFLEXORES, SECTION=CIRC
2,
**%
```

Figura 43. Asignación de propiedades a los elementos

Una vez definidas las propiedades de los elementos, solo queda definir las condiciones de contorno y las cargas en los nudos. Para definir las condiciones de contorno, se insertan los grupos de nudos en los que queremos restringir el movimiento, y se indica en que direcciones no está permitido el movimiento.

Debajo, se insertan los grupos de nudos en los que se quiere aplicar una carga, y se indica el valor y el sentido de la carga en cada una de las direcciones principales.



```
PiePuntillas - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
*BOUNDARY
CARGATALONAQUILES,1,3,0.0
NODOS11APOYO,1,3,0.0
NODOSHORIZONTAL,3,3,0.0
NODOSCONTACTOFLEXORES,1,1,0.0
*END STEP
*****
*STEP
*STATIC
*BOUNDARY, FIXED
159741, 1, 1
159742, 1, 1
159743, 1, 1
159744, 1, 1
159745, 1, 1
159746, 1, 1
159747, 1, 1
159748, 1, 1
159749, 1, 1
*CLOAD
NODOSPARACARGA70,2,4.7,
NODOSPARACARGA70,3,-1.71,
*BOUNDARY
CARGATALONAQUILES,1,3,0.0
NODOS11APOYO,1,3,0.0
NODOSHORIZONTAL,3,3,0.0
NODOS3FALANGE,1,3,0.0
*END STEP
```

Figura 44. Condiciones de apoyo y carga

7.1. MODELO DE PIE APOYADO

El proyecto tiene como objetivo estudiar el impacto de la extracción ósea en las tensiones del primer metatarso, así como comprobar los desplazamientos adicionales que esta extracción puede ocasionar.

Como ya se ha explicado, el estudio contempla 3 volúmenes de extracción que aumentan de forma progresiva. Para cada situación se estudiarán las tensiones en el hueso donde se realiza la operación, así como la deformación del pie.

7.1.1. TENSIONES MAXIMAS. TRACCIÓN

Se estudiará el incremento de tensiones a tracción en el primer metatarso, tomando como referencia el caso el hueso sano, y aumentando hasta alcanzar un volumen de $5 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^2$.

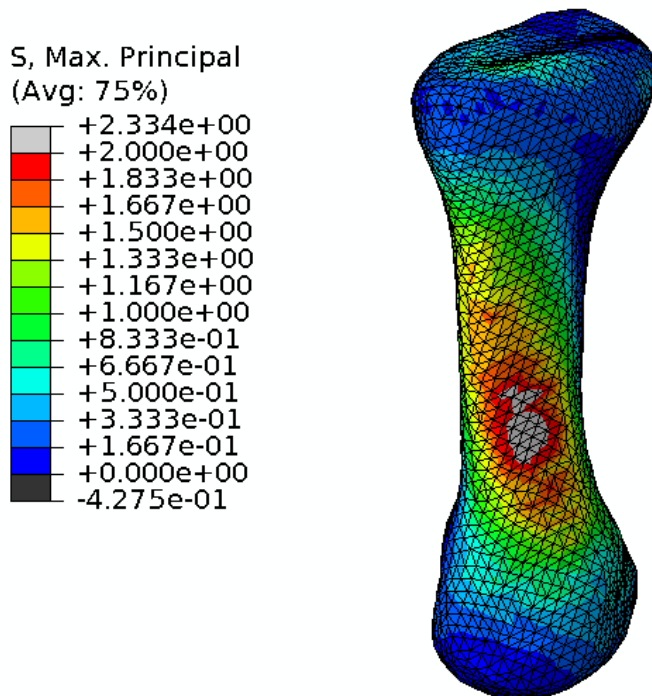


Figura 45. Caso sano. Vista dorsal

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

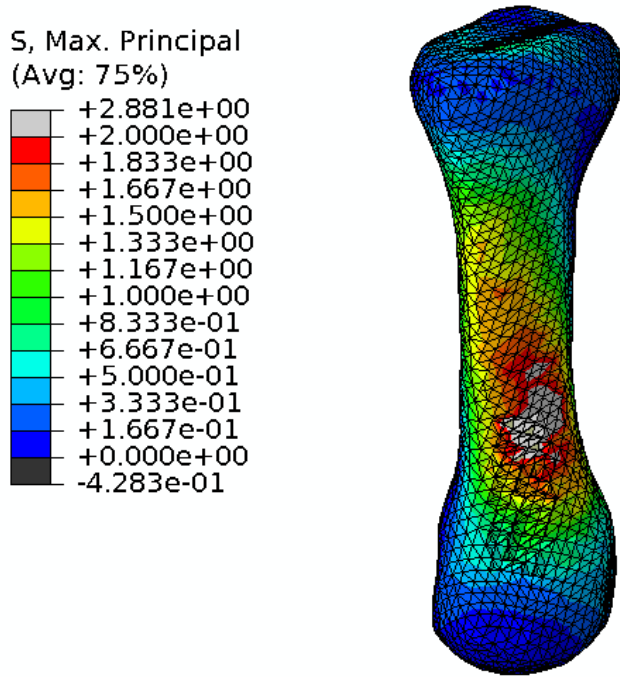


Figura 46. Caso 1, extracción de $15 \times 10 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

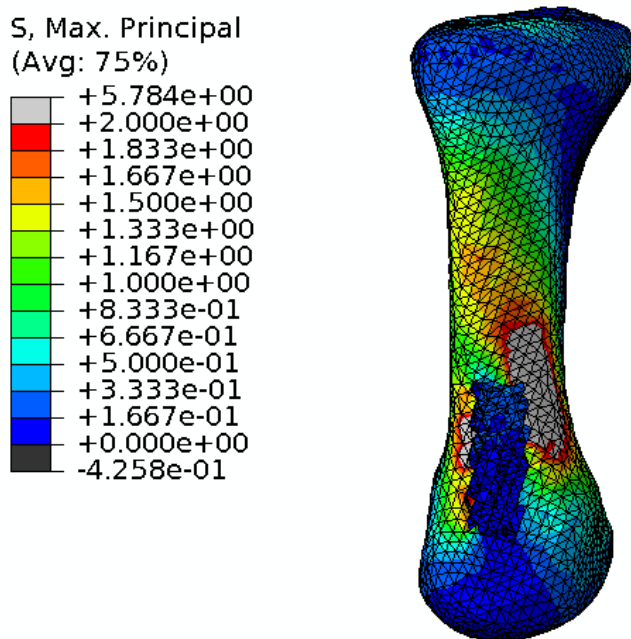


Figura 47. Caso 2, extracción de $15 \times 10 \times 1.76 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

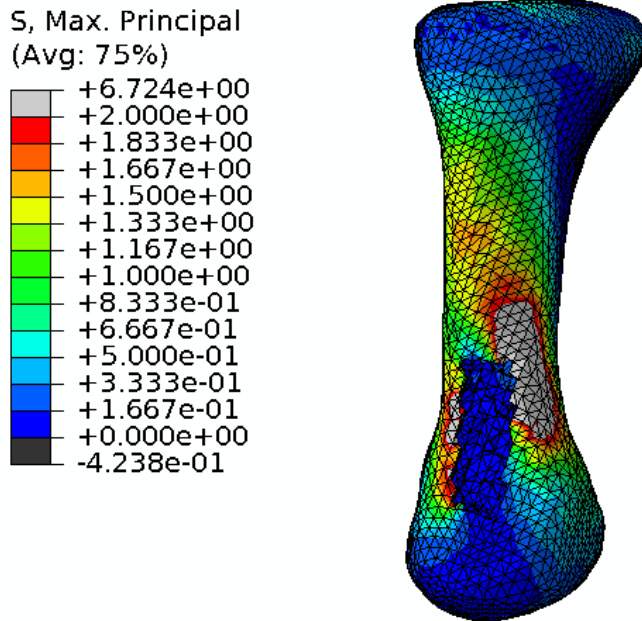


Figura 48. Caso 3, extracción de $15 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

Analizando los resultados obtenidos en las simulaciones se pueden detallar las siguientes consideraciones:

- Las tensiones máximas en el hueso aumentan de forma considerable a medida que se profundiza en la extracción del tejido óseo.
- La tensión alrededor del área de extracción se incrementa conforme aumenta el volumen de hueso extraído.
- La extracción de material conlleva un aumento apreciable del área donde existen tensiones.

7.1.2. TENSIONES MINIMAS. COMPRESIÓN

Al igual que en el caso anterior, se estudiarán las tensiones mínimas en el primer metatarso.

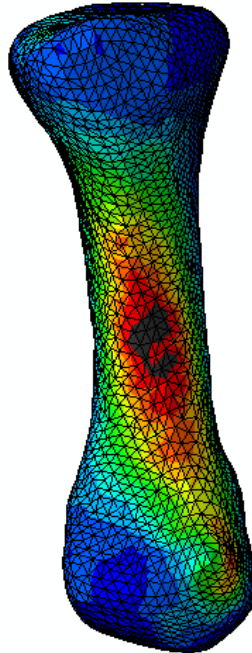
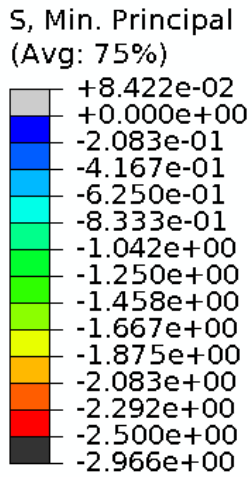


Figura 49. Caso sano. Vista plantar

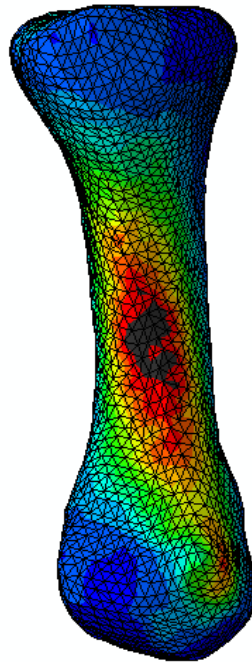
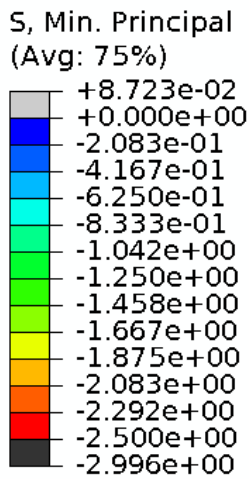


Figura 50. Caso 1, extracción de 15x10x0.8 mm³. Vista plantar

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

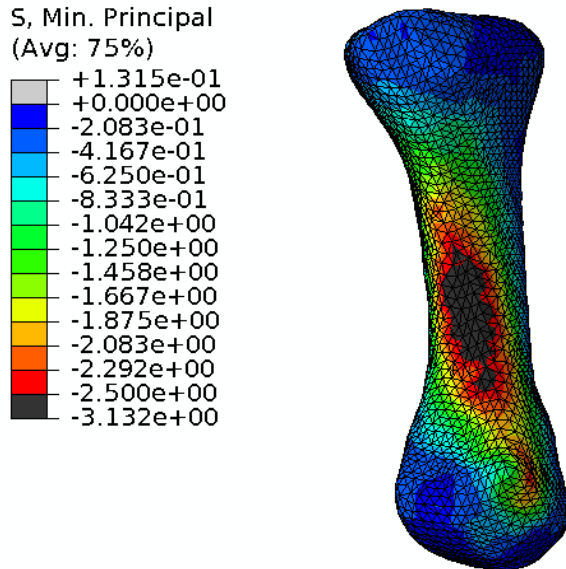


Figura 51. Caso 2, extracción de $15 \times 10 \times 1.76 \text{ mm}^3$. Vista plantar

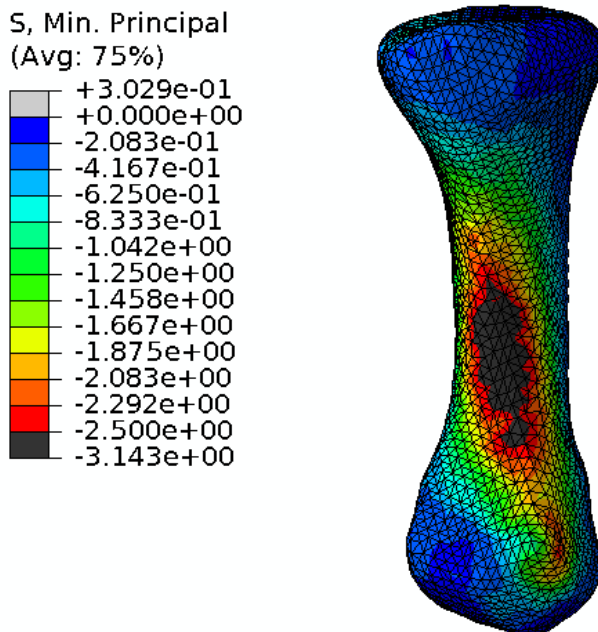


Figura 52. Caso 3, extracción de $15 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$. Vista plantar

La variación de resultados de un modelo no es significativa, sin embargo pueden apreciarse diferentes resultados:

- Existe un incremento de tensiones máximas negativas, aunque muy inferior al incremento observado para las tensiones máximas positivas.
- El incremento de tensiones negativas se focaliza en la zona donde las tensiones eran máximas en el caso sano.
- La extracción de material conlleva un aumento apreciable del área donde existen tensiones

7.1.3. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 1. U1

Se analizaran los desplazamientos en los ejes coordenados para poder estudiar el impacto que causa la extracción de hueso en los desplazamientos del pie.

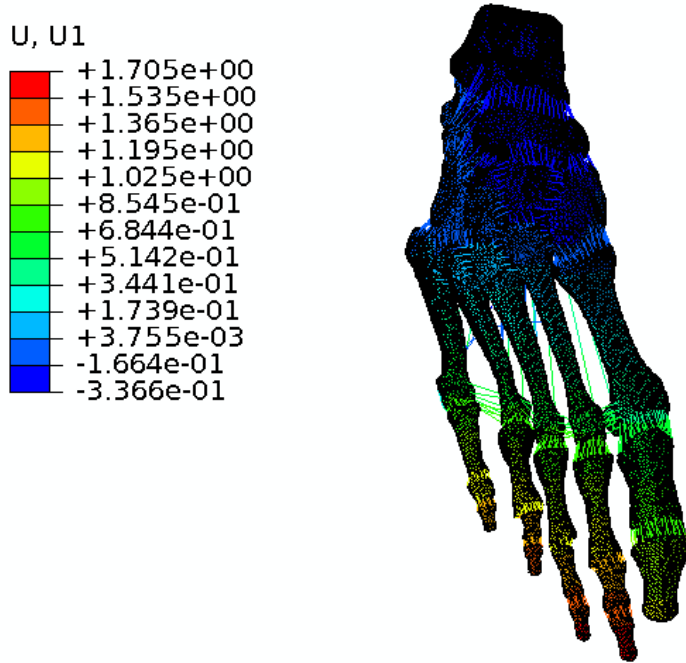


Figura 53. Caso sano. Vista dorsal

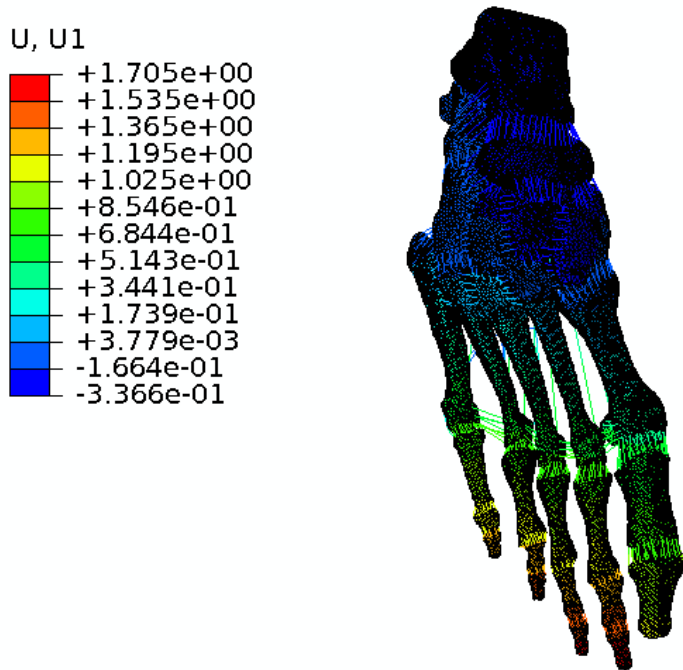


Figura 54. Caso 1, extracción de $15 \times 10 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

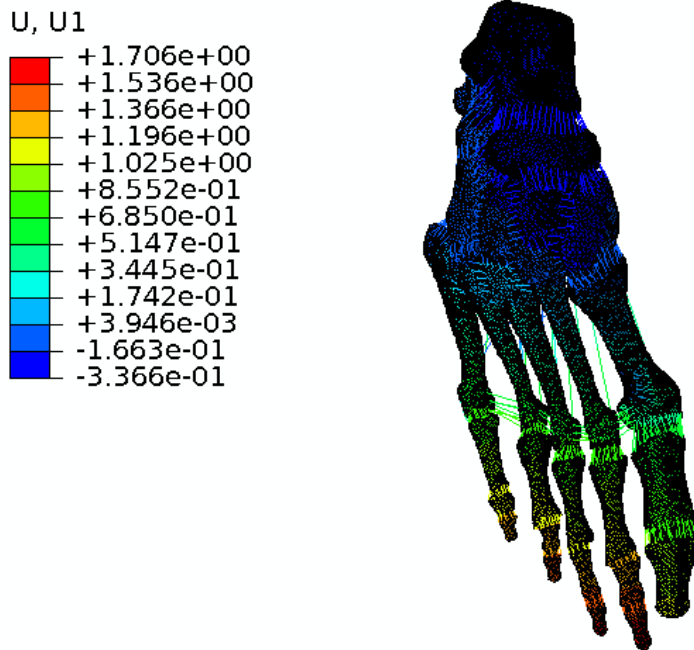


Figura 55. Caso 2, extracción de $15 \times 10 \times 1.76 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

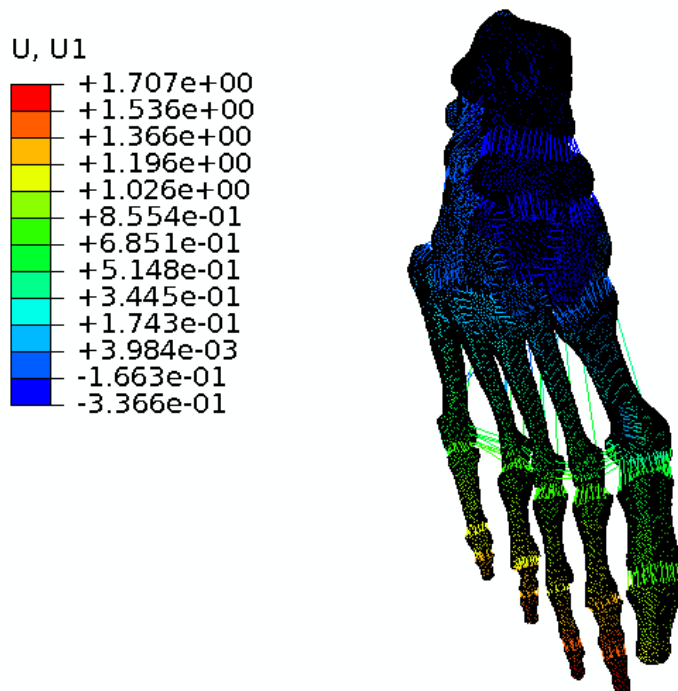


Figura 56. Caso 3, extracción de $15 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

Analizando los resultados obtenidos, se puede realizar la siguiente afirmación:

- La extracción de tejido óseo del prime metatarso no ocasiona un incremento de los desplazamientos en el eje 1 en ningún hueso del pie, ni en el primer metatarso en particular.

7.1.4. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 2. U2

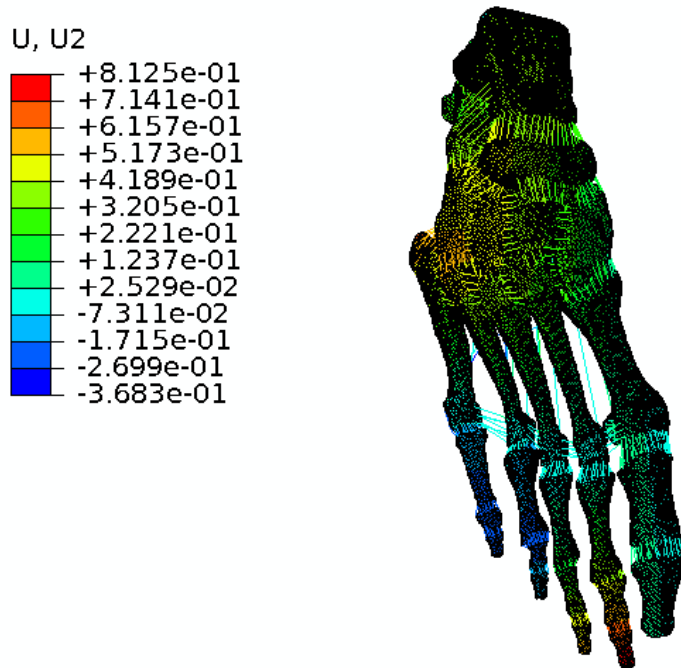


Figura 57. Caso sano. Vista dorsal

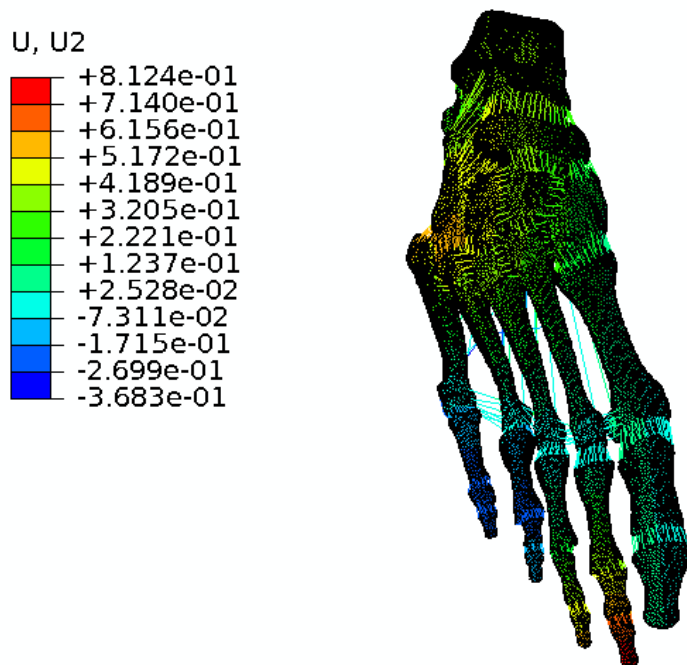


Figura 58. Caso 1, extracción de $15 \times 10 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

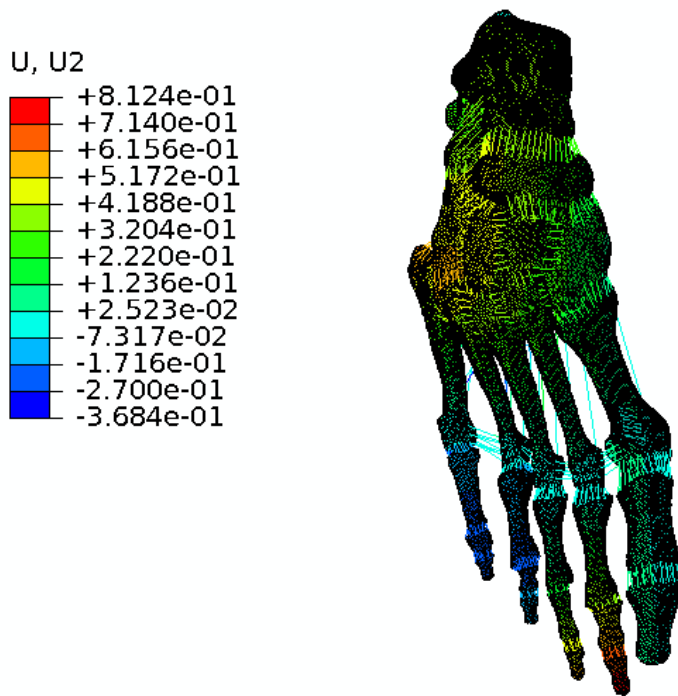


Figura 59. Caso 2, extracción de $15 \times 10 \times 1.67 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

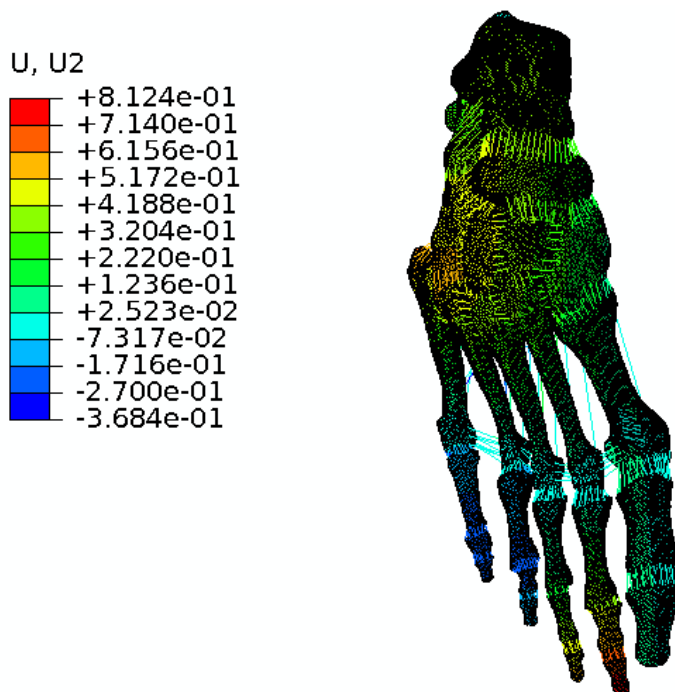


Figura 60. Caso 3, extracción de $15 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

Analizando los resultados obtenidos para los desplazamientos en el eje 2, se puede apreciar que, al igual que en el caso anterior, la extracción de material óseo no conlleva aumento alguno de los desplazamientos.

7.1.5. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 3. U3

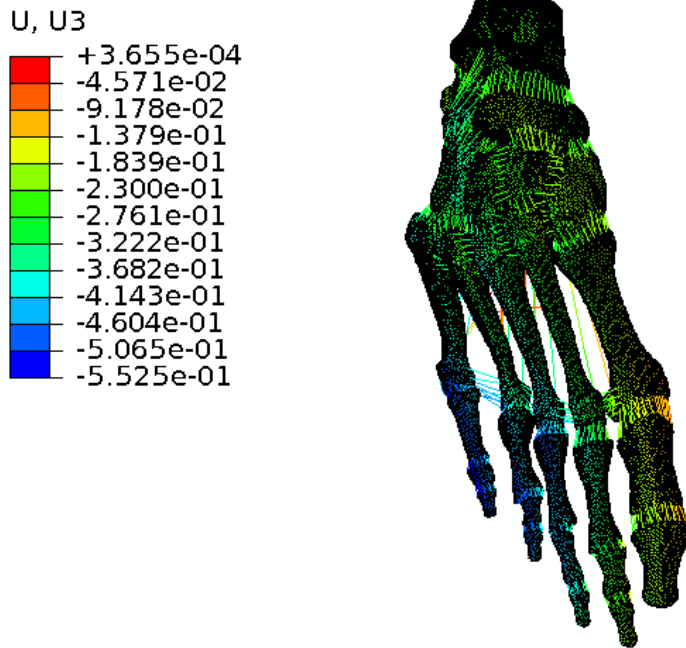


Figura 61. Caso sano. Vista dorsal

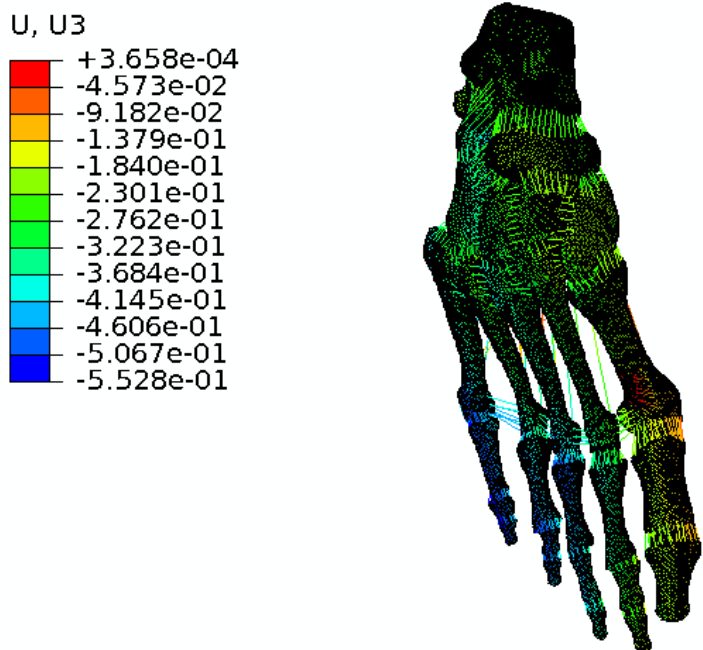


Figura 62. Caso 1, extracción de $15 \times 10 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

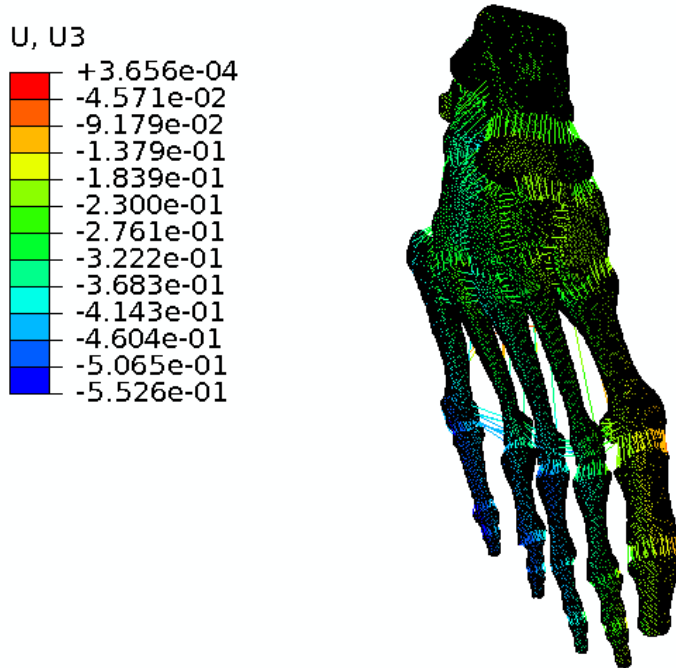


Figura 63. Caso 2, extracción de $15 \times 10 \times 1.67 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

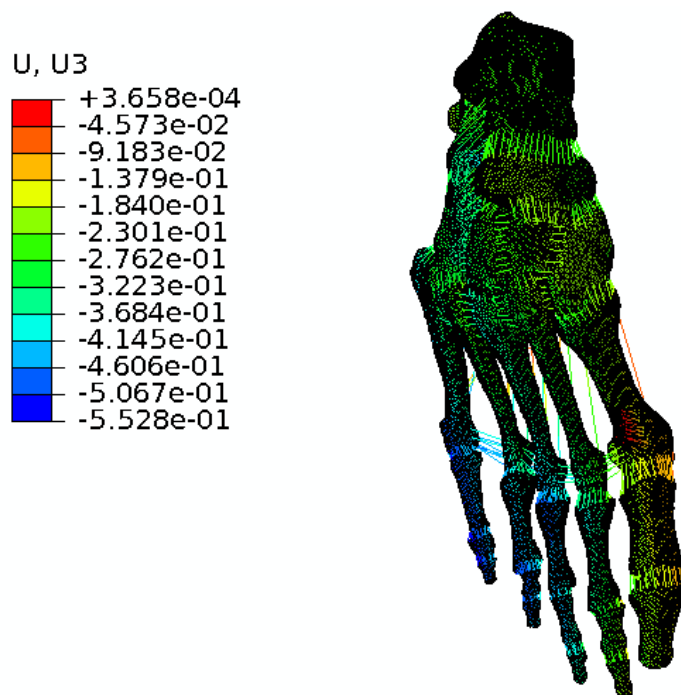


Figura 64. Caso 3, extracción de $3 \times 15 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

Observando los desplazamientos en el eje 3, se puede apreciar resultados diferentes que en el análisis de los dos desplazamientos anteriores:

- La extracción de hueso no causa un incremento apreciable de los desplazamientos máximos del pie.
- A medida que se aumenta el volumen de hueso extraído, se observa un mayor desplazamiento en la zona de apoyo del primer metatarso con el suelo.

7.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS

Se estudiaran los mismos casos que en el modelo anterior, En este modelo se ha considerado necesario incluir dos vistas del hueso en los resultados de tensiones.

7.2.1. TENSIONES MAXIMAS. TRACCIÓN

Como en el modelo anterior, se analizara el incremento de tensiones a tracción en el primer metatarso-

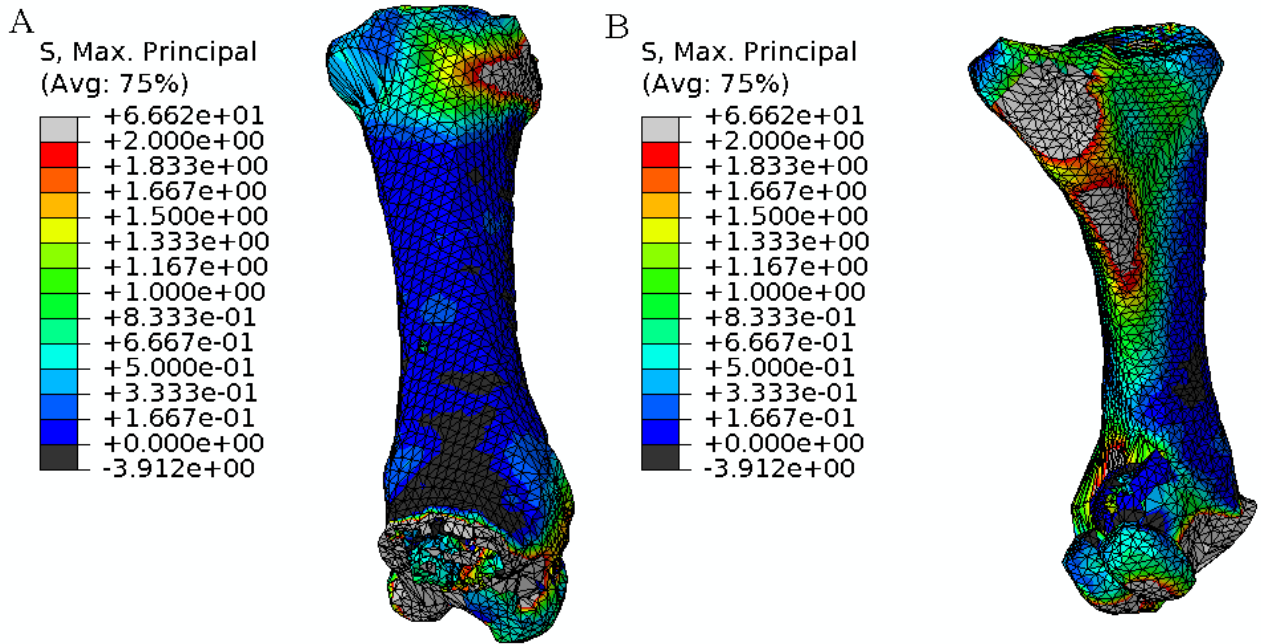


Figura 65. Caso sano. Vista dorsal (A) y plantar (B)

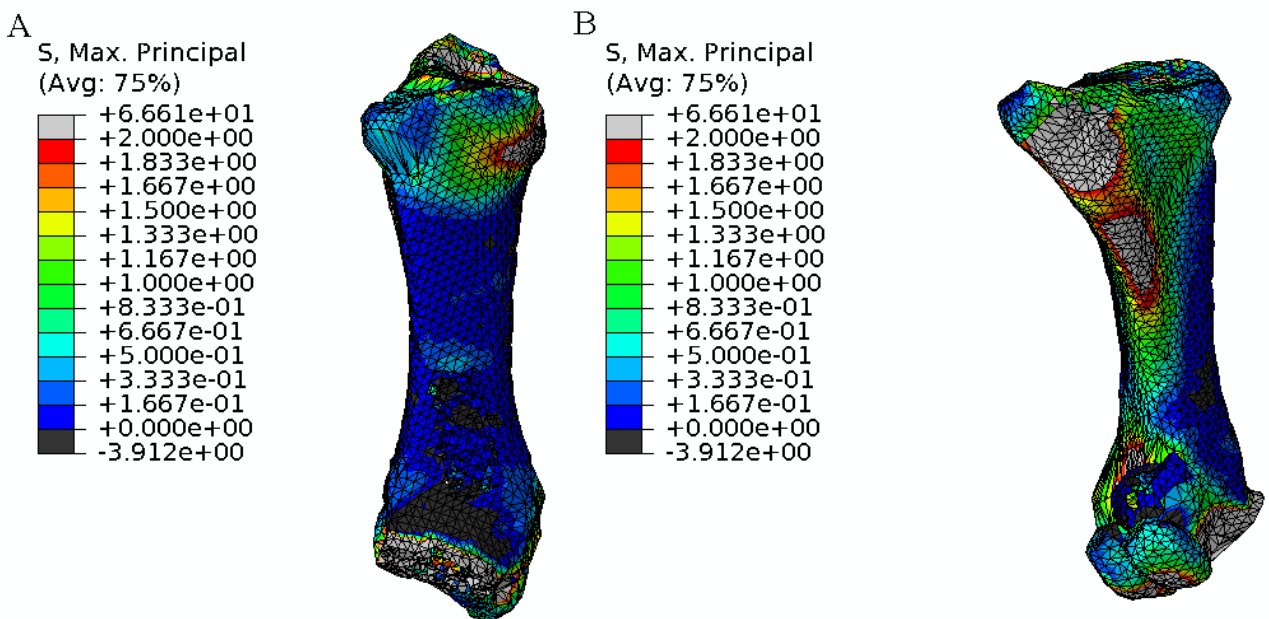


Figura 66. Caso 1, extracción de $15 \times 10 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Vista dorsal (A) y plantar (B)

ESTUDIO DE EXTRACCIÓN OSEA EN EL PRIMER METATARSO

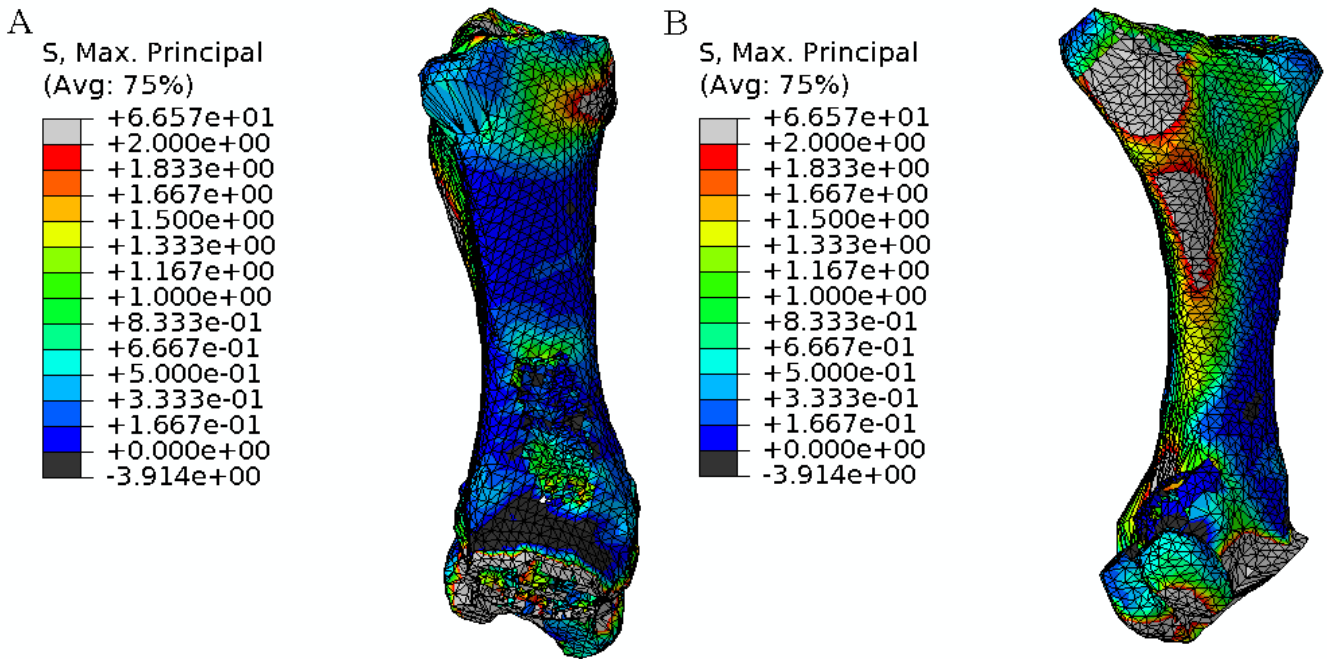


Figura 67. Caso 2, extracción de $15 \times 10 \times 1.67 \text{ mm}^3$. Vista dorsal (A) y plantar (B)

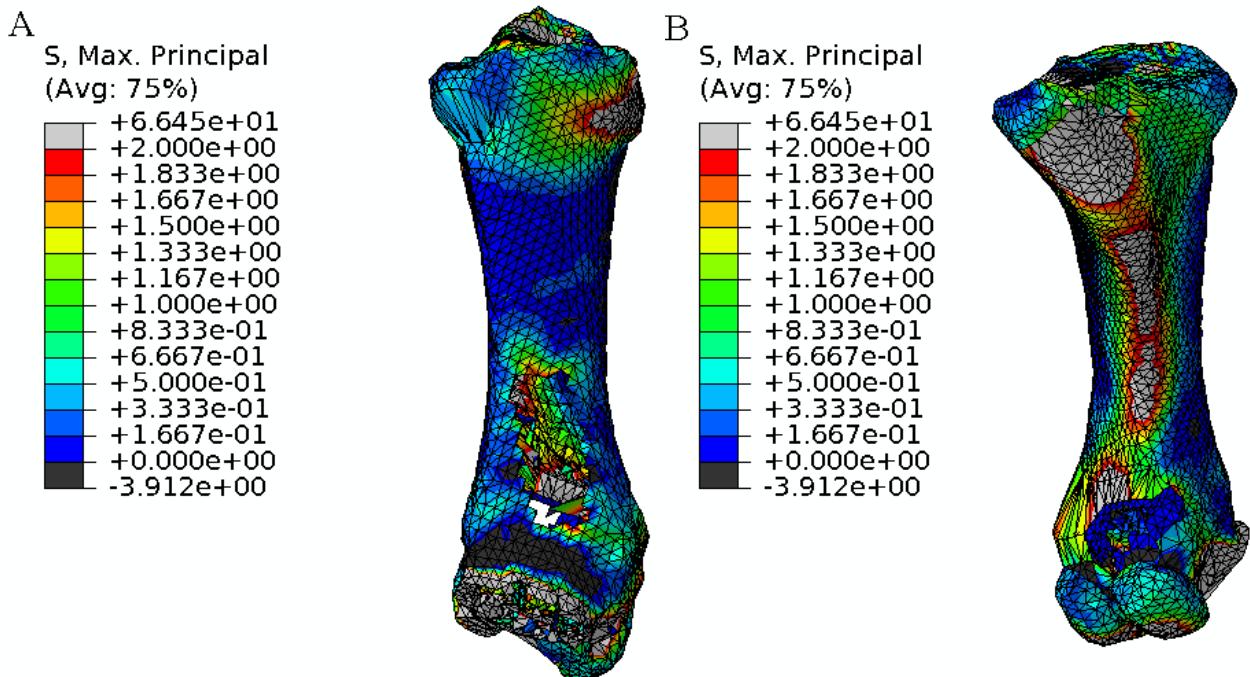


Figura 68. Caso 3, extracción de $15 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$. Vista dorsal (A) y plantar (B)

Analizando los resultados obtenidos en las simulaciones, se puede afirmar lo siguiente:

- La extracción de hueso no conlleva un incremento de las tensiones máximas.
- En la zona de la extracción se observa un fuerte incremento de las tensiones.
- La extracción ocasiona un incremento del área y los valores de las fuerzas de tracción en la zona

7.2.2. TENSIONES MINIMAS. COMPRESION

En este caso se ha optado por presentar las vistas dorsal y lateral, derecha dada la evolución de las tensiones de compresión.

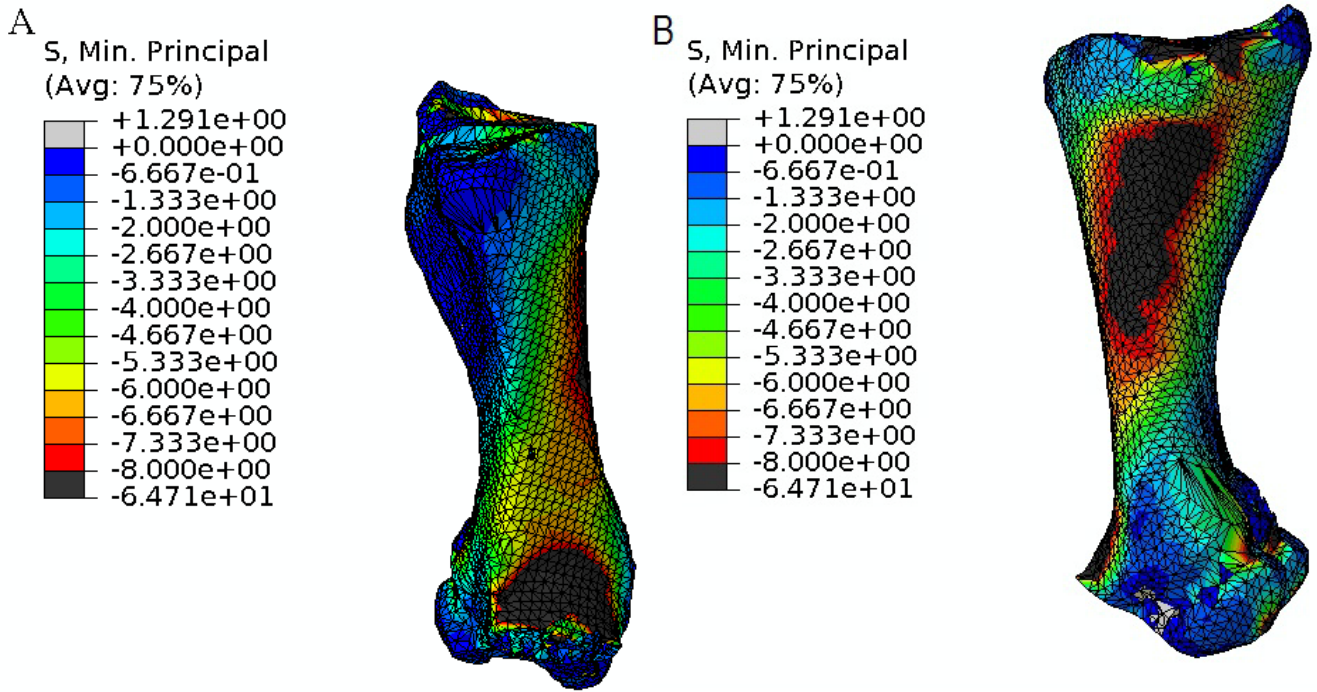


Figura 69. Caso sano. Vista dorsal (A) y lateral (B)

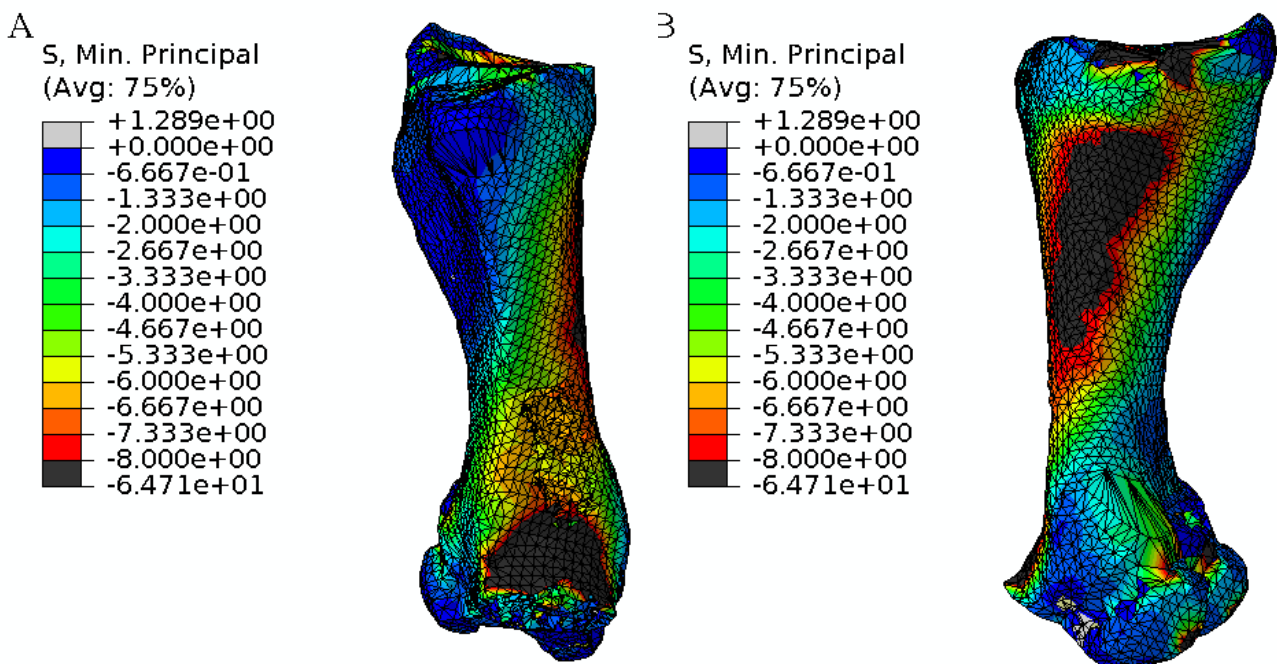


Figura 70. Caso 1, extracción de $15 \times 10 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Vista dorsal (A) y lateral (B)

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

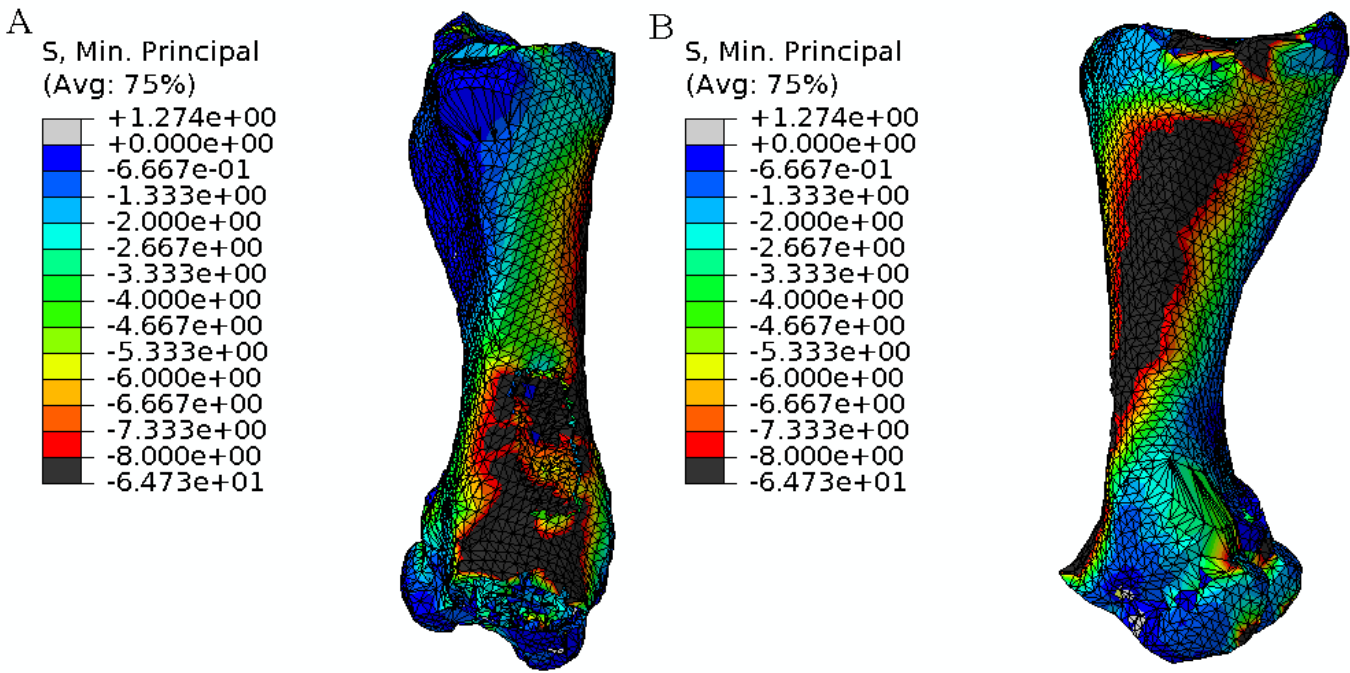


Figura 71. Caso 2, extracción de 15x10x1.67 mm³. Vista dorsal (A) y lateral (B)

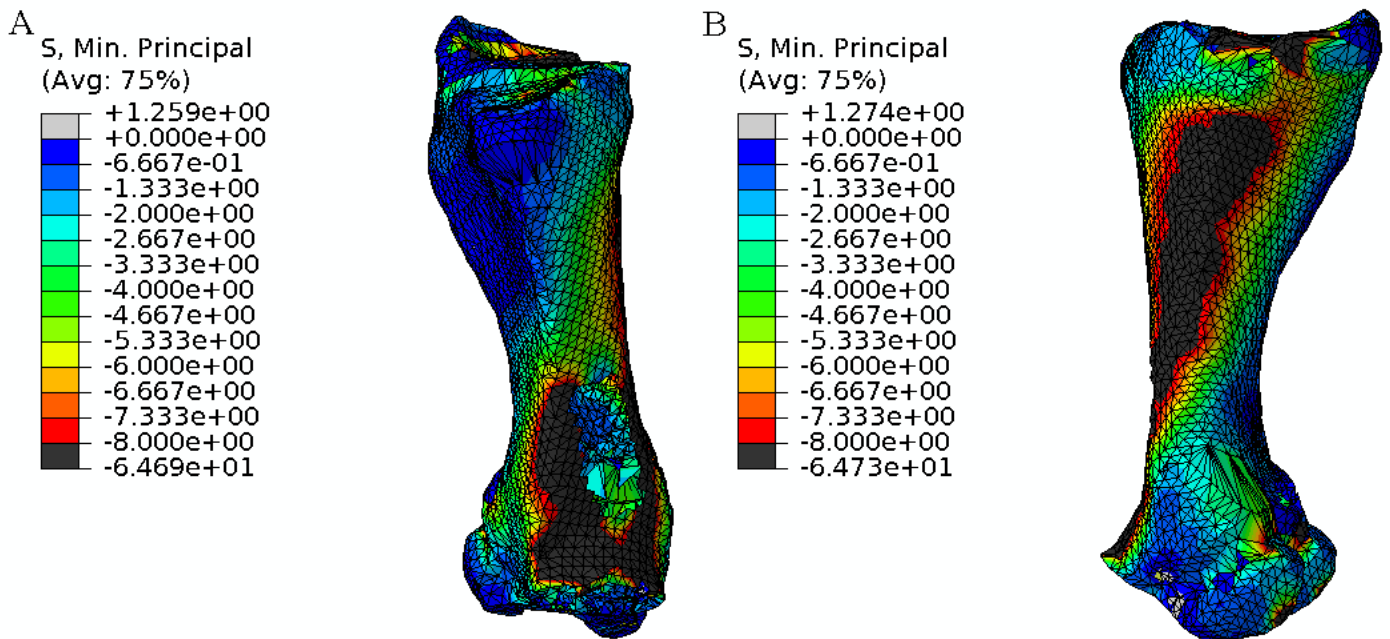


Figura 72. Caso 3, extracción de 15x10x2.5 mm³. Vista dorsal (A) y lateral (B)

Aunque los resultados son similares que en el caso de tensiones máximas, se aprecian algunas diferencias:

- La extracción de hueso no conlleva un incremento de las tensiones máximas negativas.
- Alrededor del área de extracción, se alcanzan tensiones máximas.
- En el caso de las tensiones que existían de forma previa a la extracción, incrementan su valor.
- La extracción no ocasiona un incremento del área donde existen tensiones.

7.2.3. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 1. U1

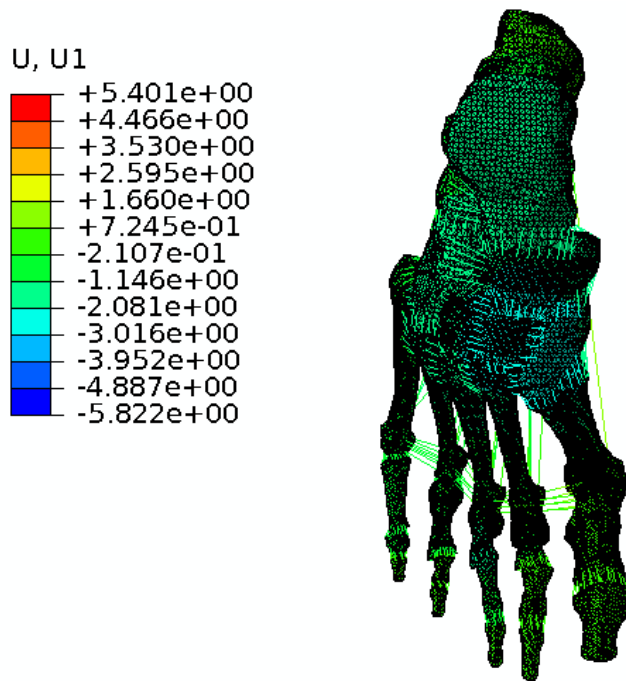


Figura 73. Caso sano. Vista dorsal

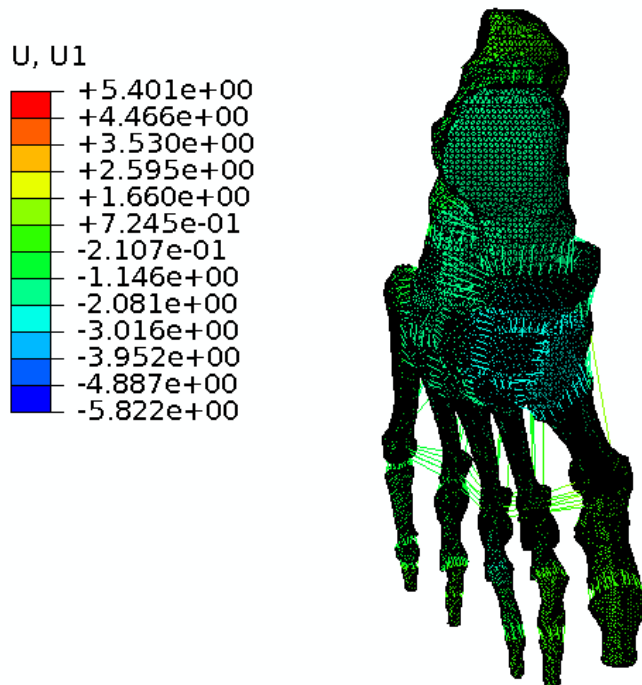


Figura 74. Caso 1, extracción de $15 \times 10 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

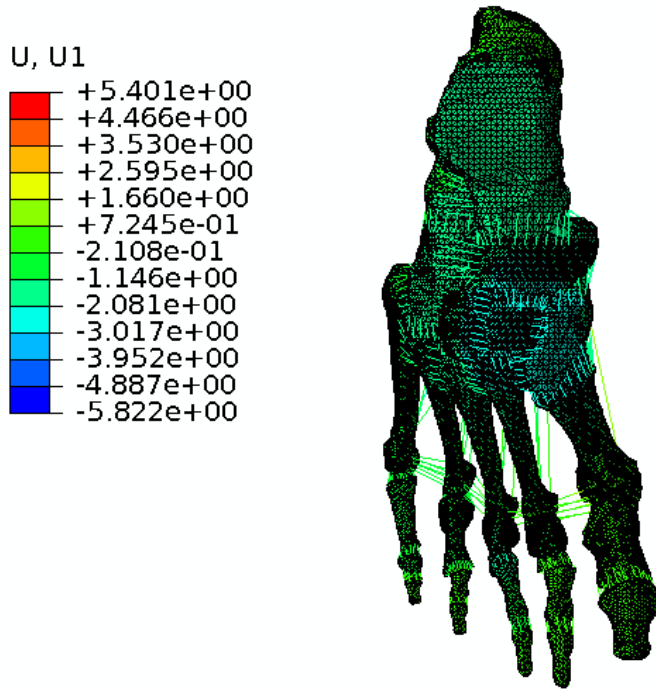


Figura 75. Caso 2, extracción de $15 \times 10 \times 1.67 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

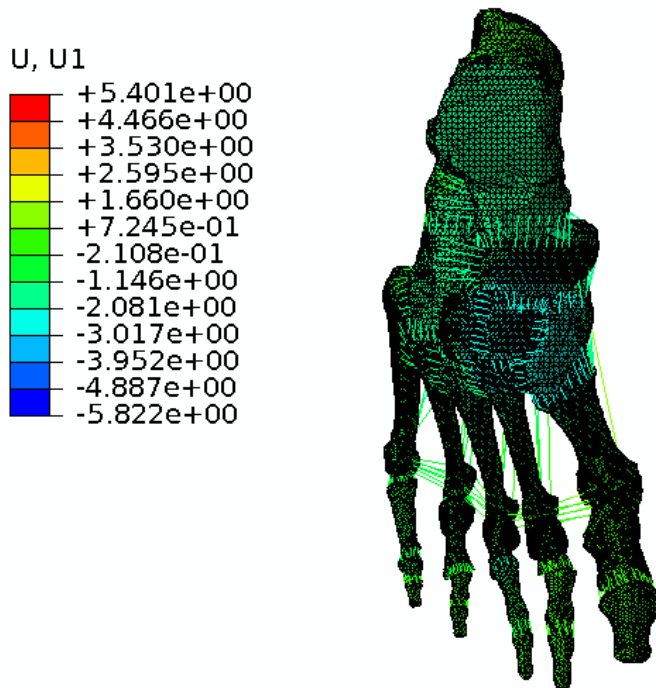


Figura 76. Caso 3, extracción de $15 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

Analizando los desplazamientos en el eje 1, se observa que la extracción de hueso en el primer metatarso no causa ningún incremento de los desplazamientos en dicho eje.

7.2.4. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 2. U2

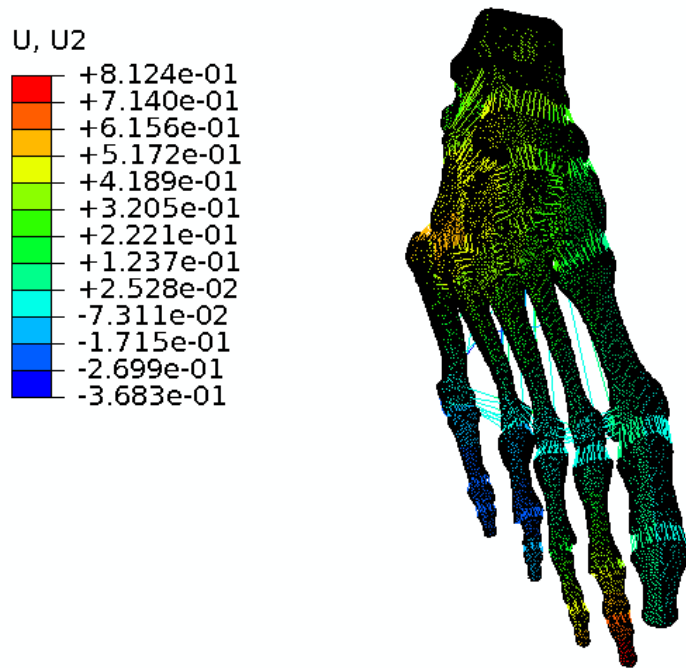


Figura 77. Caso sano. Vista dorsal

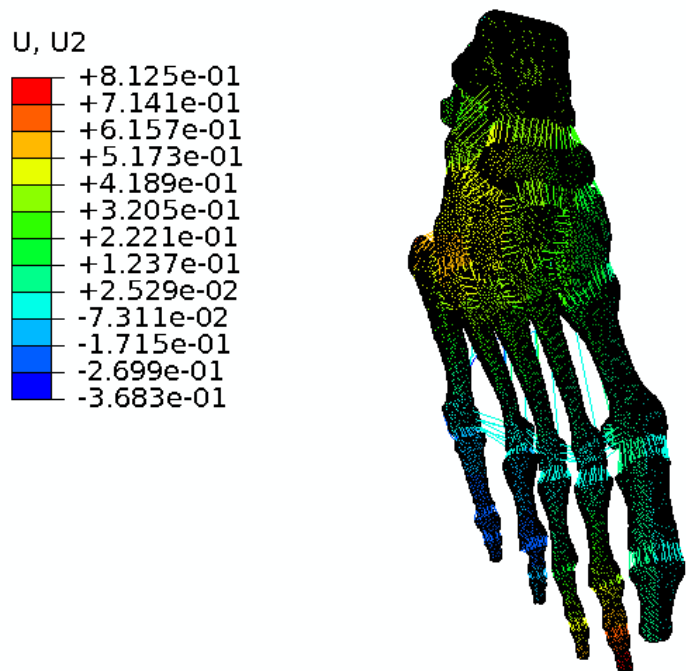


Figura 78. Caso 1, extracción de $15 \times 10 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

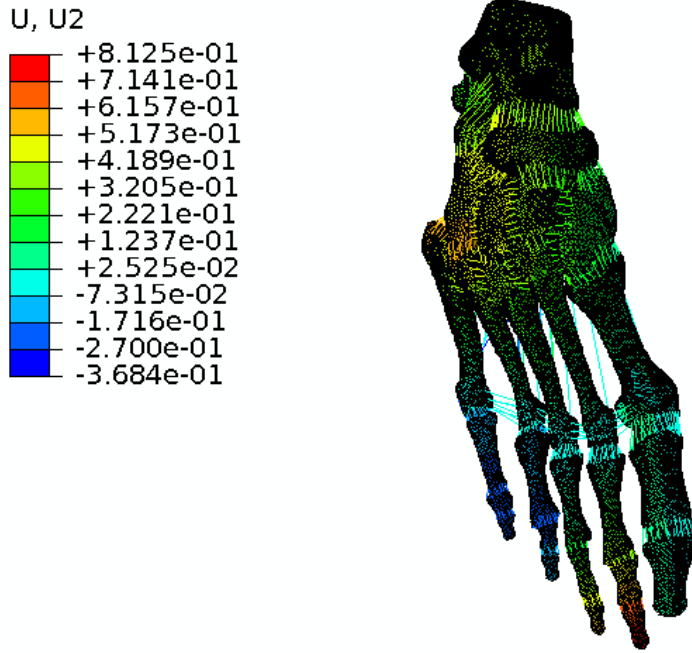


Figura 79. Caso 2, extracción de $15 \times 10 \times 1.67 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

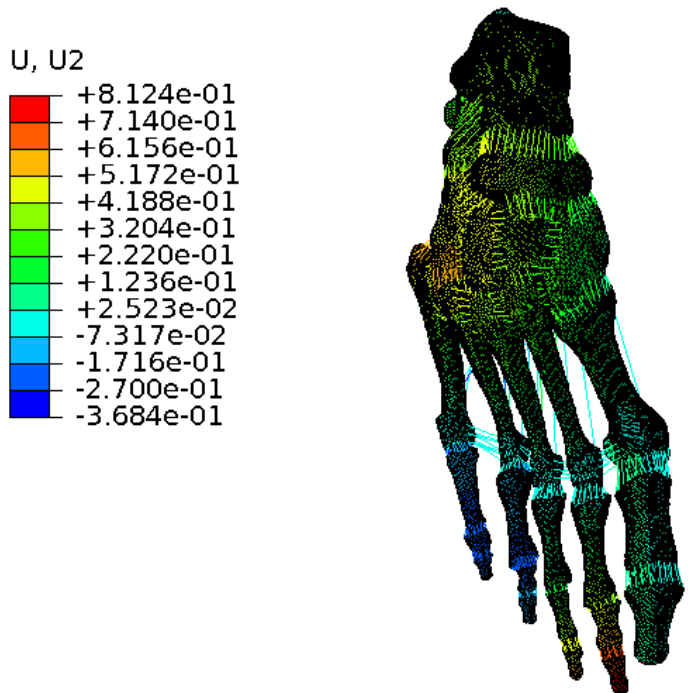


Figura 80. Caso 3, extracción de $15 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

Como en el caso anterior, no se aprecian desplazamientos en el eje 2 ocasionados por la extracción de tejido óseo en el primer metatarso.

7.2.5. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE 3. U3

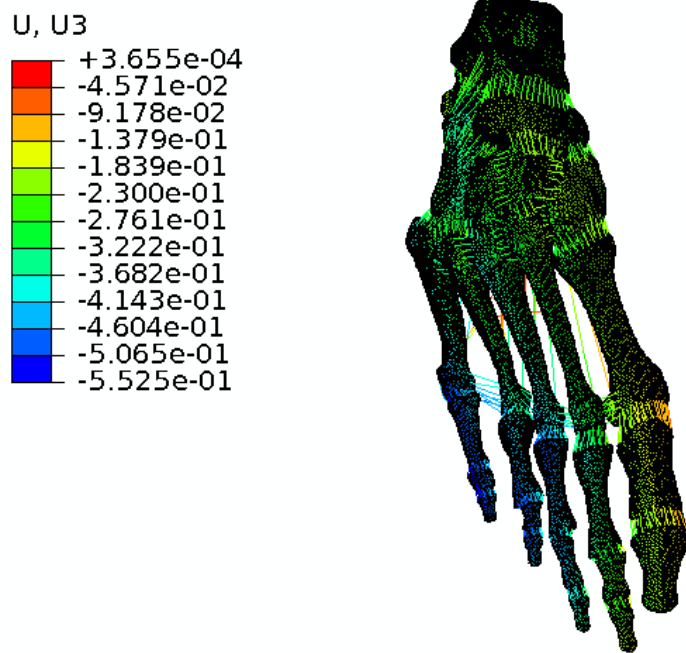


Figura 81. Caso sano. Vista dorsal

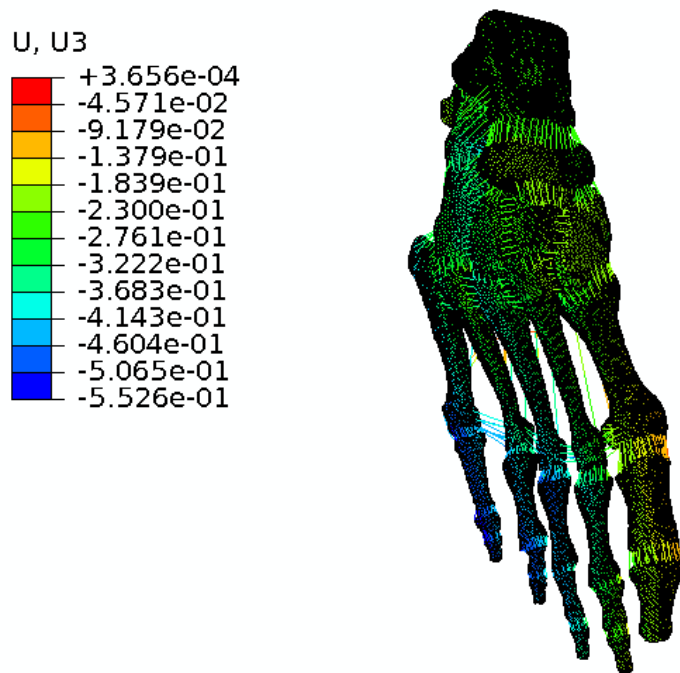


Figura 82. Caso 1, extracción de $15 \times 10 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

ESTUDIO DE EXTRACCION OSEA EN EL PRIMER METATARSO

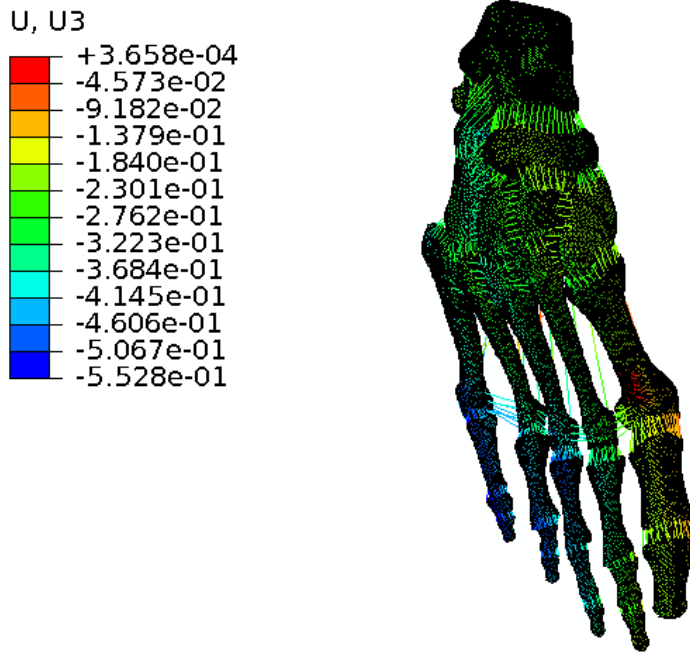


Figura 83. Caso 2, extracción de $15 \times 10 \times 1.67 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

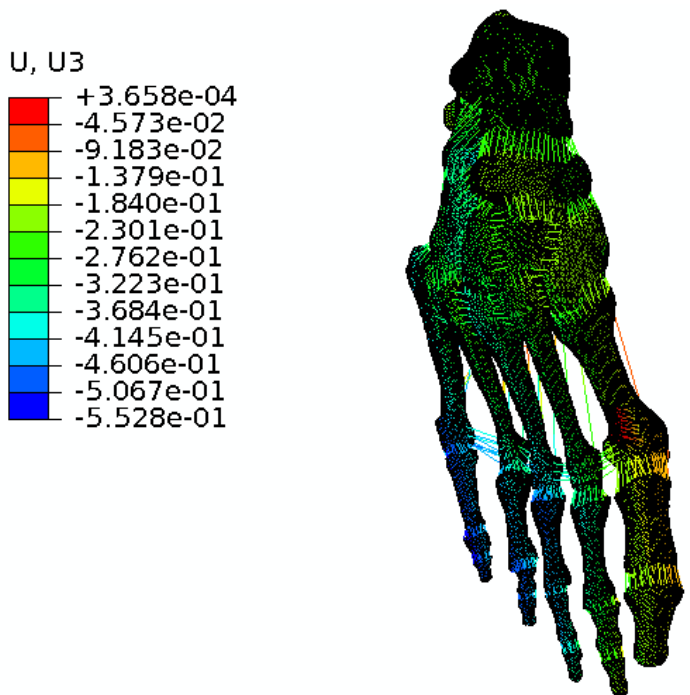


Figura 84. Caso 3, extracción de $15 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$. Vista dorsal

Observando los desplazamientos en el eje 3, se pueden observar los mismos resultados que en el modelo anterior:

- La extracción de hueso no causa un incremento apreciable de los desplazamientos máximos del pie.
- A medida que se aumenta el volumen de hueso extraído, se observa un mayor desplazamiento en la zona distal inferior del primer metatarso.

8. CONCLUSIONES:

8.1.1. MODELO DE PIE APOYADO

El aumento de hueso extraído produce pequeños incrementos de desplazamiento en la dirección perpendicular al suelo. Aunque no son excesivos, podrían ocasionar desequilibrios en el paciente estando de pie.

Las tensiones de tracción aumentan considerablemente a medida que se incrementa el volumen de hueso extraído y se concentran cerca de la zona de extracción, lo que podría causar dolor o incluso puede significar la rotura del primer metatarso.

Las tensiones de compresión también se incrementan a medida que aumenta la extracción, pero no tanto como las tensiones de tracción. No obstante, sí que aumenta considerablemente el área de hueso donde existen cargas máximas, lo que puede producir dolores en el paciente, pues aquellas zonas que deberían estar sometidas a una carga menor, ahora están más cargadas.

8.1.2. MODELO DE PIE PUNTILLAS

Al igual que en el caso anterior, apenas hay cambios en los desplazamientos salvo en la dirección perpendicular al suelo, lo que podría producir desequilibrios en el paciente estando de pie.

Las tensiones de tracción, a diferencia de en el caso anterior, no aumentan de forma considerable a medida que se extrae más hueso, aunque sí que aumenta el área de la zona que está más cargada, lo que podría traducirse en dolor para el paciente.

Las tensiones de compresión aumentan a medida que aumenta la extracción, pero no en exceso. Sin embargo, se concentran alrededor de la zona de extracción a medida que aumenta la cantidad de hueso extraído, por lo que aumenta el área de actuación considerablemente respecto del caso sano, lo que podría provocar dolor en el paciente.

8.2. RESUMEN

- La zona de intervención quirúrgica concentra tensiones de tracción estando de pie y aumenta tensiones de compresión estando de puntillas, lo que provoca fenómenos de fatiga en el hueso, que podrían conducir a la rotura del mismo.
- En general, los valores de las tensiones –salvo las máximas de tracción estando de pie- no sufren un gran aumento a medida que se extrae material óseo, pero sí que se produce una redistribución de las tensiones en partes de hueso que en el caso sano están sometidas a estados tensionales más bajos, lo que conlleva dolor en el paciente o incluso fractura del hueso.