



Universidad  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

EFFECTOS BIOMECÁNICOS DE LA CIRUGÍA DE  
ELIMINACIÓN DE ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO ANTE  
DIVERSAS POSICIONES Y SOLICITACIONES DEL PIE EN  
SITUACIONES DE LA VIDA COTIDIANA

BIOMECHANICAL EFFECTS OF THE REMOVAL  
SURGERY CALCANEAL SPUR TO DIFFERENT  
POSITIONS AND FOOT LOADS IN DAILY LIFE  
SITUATIONS

Autor/es

MARCOS MURILLO ROYO

Director/es

JAVIER BAYOD LÓPEZ

FACULTAD DE EDUCACIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DE ZARAGOZA

Año

DICIEMBRE 2017



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

EFFECTOS BIOMECÁNICOS DE LA CIRUGÍA DE  
ELIMINACIÓN DE ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO ANTE  
DIVERSAS POSICIONES Y SOLICITACIONES DEL PIE EN  
SITUACIONES DE LA VIDA COTIDIANA

BIOMECHANICAL EFFECTS OF THE REMOVAL  
SURGERY CALCANEAL SPUR TO DIFFERENT  
POSITIONS AND FOOT LOADS IN DAILY LIFE  
SITUATIONS

Autor/es

MARCOS MURILLO ROYO

Director/es

JAVIER BAYOD LÓPEZ

FACULTAD DE EDUCACIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DE ZARAGOZA

Año

DICIEMBRE 2017



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. \_\_\_\_\_,

con nº de DNI \_\_\_\_\_ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
\_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, \_\_\_\_\_

Fdo: \_\_\_\_\_

# RESUMEN

---

## EFECTOS BIOMECÁNICOS DE LA CIRUGÍA DE ELIMINACIÓN DE ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO ANTE DIVERSAS POSICIONES Y SOLICITACIONES DEL PIE EN SITUACIONES DE LA VIDA COTIDIANA

Este proyecto tiene como principal objetivo estudiar los efectos biomecánicos que se producen en el pie tras la técnica quirúrgica de eliminación de un espolón en el calcáneo.

Se parte de dos mallas realizadas por un software 3D donde se realiza la remodelación de dicha malla simulando la intervención quirúrgica del especialista y la parte ósea que se retira. La primera malla simula el modelo de pie apoyado, en su posición natural. La segunda malla representa el pie apoyado de puntillas, es decir, apoyado en las falanges de los dedos y con el talón levantado.

Una vez se tienen las nuevas mallas con los apoyos redefinidos y las situaciones de carga, se procede a la simulación por el método de los elementos finitos para estudiar el comportamiento del pie ante diferentes solicitaciones de situaciones en la vida cotidiana.

Mediante los diagramas de tensión y deformación obtenidos por el software se podrá establecer la efectividad del método quirúrgico y los efectos biomecánicos que produce la eliminación del espolón para así establecer las conclusiones pertinentes y discutir sobre los resultados obtenidos.

Tal y como se puede suponer, cuanto más crítica es la sollicitación del pie, es decir, la carga que se aplica en la simulación, las tensiones sufridas en el hueso calcáneo son de mayor valor, pero se ha visto que también tiene repercusión que cantidad de hueso se retira en la intervención.



# TABLA DE CONTENIDOS

---

1.	INTRODUCCIÓN .....	6
1.1.	OBJETO DEL PROYECTO .....	6
1.2.	ALCANCE DEL PROYECTO .....	6
1.3.	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	7
2.	PATOLOGÍA DEL PROBLEMA DEL ESTUDIO .....	8
2.1.	¿QUE ES UN ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO?.....	8
2.2.	POSIBLES CAUSAS DE LA APARICIÓN DEL ESPOLÓN.....	10
2.3.	DIAGNÓSTICO Y SÍNTOMAS PRINCIPALES DEL ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO ...	10
2.4.	CONSEJOS Y SOLUCIONES PARA LA ELMINIACIÓN DEL ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO .....	11
2.4.1.	TRATAMIENTOS Y PREVENCIÓN SIN CIRUGÍA .....	12
2.4.2.	TRATAMIENTO QUIRÚRGICO DEL ESPOLÓN .....	13
2.5.	RESULTADO DEL ESPOLÓN TRAS INTERVENCIÓN QUIRÚRGICA DE ELIMINACIÓN.....	14
3.	CARACTERIZACIÓN DE LA MALLA Y SOLICITACIONES PARA LOS MODELOS....	17
3.1.	DISEÑO DE LA MALLA MODELO “PIE APOYADO” Y CONDICIONES PARA LAS SIMULACIONES .....	17
3.1.1.	DISEÑO DEL MATERIAL ÓSEO RETIRADO .....	19
3.1.2.	CARGAS Y SOLICITACIONES .....	20
3.2.	DISEÑO DE LA MALLA MODELO “PIE PUNTILLAS” Y CONDICIONES PARA LAS SIMULACIONES .....	22
3.2.1.	DISEÑO DEL MATERIAL ÓSEO RETIRADO .....	24
3.2.2.	CARGAS Y SOLICITACIONES .....	25
3.3.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DEL MODELO .....	26
4.	SIMULACIÓN MEDIANTE M.E.F Y RESULTADOS .....	27
4.1.	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	27
4.2.	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL MODELO “PIE APOYADO” .....	28
4.2.1.	RESULTADOS DE TENSIONES DE COMPRESIÓN Y TRACCIÓN .....	29
4.2.2.	RESULTADOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS.....	33

4.2.3.	RESUMEN DE COMPARATIVA Y RESULTADOS.....	35
4.3.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PIE PUNTILLAS .....	36
4.3.1.	RESULTADOS DE TENSIONES DE COMPRESIÓN Y TRACCIÓN .....	36
4.3.2.	RESULTADOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS.....	39
4.3.3.	RESUMEN Y COMPARATIVA DE RESULTADOS.....	39
5.	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO Y DISCUSIÓN .....	40
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	42
ANEXO A – Análisis gráfico y numérico de las simulaciones del modelo “Pie Apoyado”		
.....		44
A.1.	RESULTADO Y COMPARATIVA DE LAS TENSIONES DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN	
.....		44
A.1.1.	COMPARATIVA RESULTADOS CASO 1 DE CARGA .....	44
A.1.2.	COMPARATIVA RESULTADOS CASO 2 DE CARGA .....	46
A.1.3.	COMPARATIVA RESULTADOS CASO 3 DE CARGA .....	48
A.2.	RESULTADO Y COMPARATIVA DE LOS DESPLAZAMIENTOS.....	50
A.2.1.	COMPARATIVA CASO 1 DE CARGA.....	50
A.2.2.	COMPARATIVA CASO 2 DE CARGA.....	51
A.2.3.	COMPARATIVA CASO 3 DE CARGA.....	53
ANEXO B – Análisis gráfico y numérico de las simulaciones del modelo “Pie Puntillas”		56
.....		
B.1.	RESULTADO Y COMPARATIVA DE LAS TENSIONES DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN	
.....		56
B.1.1.	COMPARATIVA CASO 1 DE CARGA .....	56
B.1.2.	COMPARATIVA CASO 2 DE CARGA .....	57
B.1.3.	COMPARATIVA CASO 3 DE CARGA .....	58
B.2.	RESULTADO Y COMPARATIVA DE LOS DESPLAZAMIENTOS.....	59
B.2.1.	COMPARATIVA CASO 1 DE CARGA .....	59
B.2.2.	COMPARATIVA CASO 2 DE CARGA .....	60
B.2.3.	COMPARATIVA CASO 3 DE CARGA .....	61
7.	TABLA DE ILUSTRACIONES.....	62



# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. OBJETO DEL PROYECTO**

Se va a establecer como objetivo de este proyecto estudiar el efecto o efectos biomecánicos que produce un tipo de cirugía realizada en el pie, en este caso concreto, la cirugía de la eliminación de un espolón en el hueso calcáneo. Esta cirugía se va a realizar mediante la simulación por el método de los elementos finitos de una malla modelada por un software 3D y cuyos resultados y conclusiones estarán basados en los valores obtenidos en cuanto a deformaciones y las tensiones en el modelo tras aplicar las cargas correspondientes de las diferentes sollicitaciones de la vida cotidiana.

Para poder conocer los efectos de las sollicitaciones estudiadas, se remodelará la malla del pie original y se realizarán los cálculos necesarios para poder realizar las comparativas con los resultados obtenidos y así establecer las conclusiones que se expondrán a lo largo del presente estudio.

## **1.2. ALCANCE DEL PROYECTO**

El presente proyecto se puede englobar dentro de la rama de la Biomecánica, la cuál es la ciencia encargada del estudio de fenómenos cinemáticos y mecánicos que presentan los seres vivos considerados como sistemas complejos formados por tejidos, sólidos y cuerpos mecánicos.

La Biomecánica se estableció como disciplina reconocida y como área de investigación autónoma en la segunda mitad del siglo XX, en gran parte, gracias a los trabajos de Yuan C. Fung, cuyas investigaciones a lo largo de unas cuatro décadas, marcaron en gran parte los temas de interés de cada momento.

En esta área de conocimiento, existen apoyos en diversas ciencias biomédicas, utilizando conocimientos de mecánica, ingeniería, anatomía, fisiología y demás disciplinas, para así resolver los problemas derivados de las diversas condiciones a las que el cuerpo humano puede verse sometido.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La realización de ensayos biomecánicos y estudios del comportamiento del pie es un tema muy común, debido a que a lo largo del tiempo, han ido surgiendo diversas patologías detectadas en el tren inferior del cuerpo humano, en este caso, centradas en el pie, y que se deben principalmente, a la pisada y a sollicitaciones tan cotidianas como la de caminar.

Médicos especializados en la rama de traumatología, y en especial, médicos cirujanos, cuentan con nuevas tecnologías en cuanto a la detección de patologías y al origen de las mismas, ya que en un principio, se desconocía su procedencia.

Con este tipo de estudios que engloban ensayos de estas características, se consigue mejorar la actuación de los mismos en sus intervenciones y se intentan minimizar así posibles efectos secundarios derivados de las técnicas quirúrgicas que se utilizan.

Con la realización de este tipo de estudios, y otros muchos de mayor complejidad, se puede llegar a determinar las características mecánicas del comportamiento del pie humano, ante distintas sollicitaciones, que de otro modo serían totalmente incongruentes.

En cuanto a la patología del espolón, una alta mayoría de la población sufre este tipo de exostosis ósea, pero sólo un 15 % presenta síntomas suficientes para realizar la intervención. No siempre el espolón tiene que ser doloroso, y normalmente se descubre de forma accidental a través de radiografías.

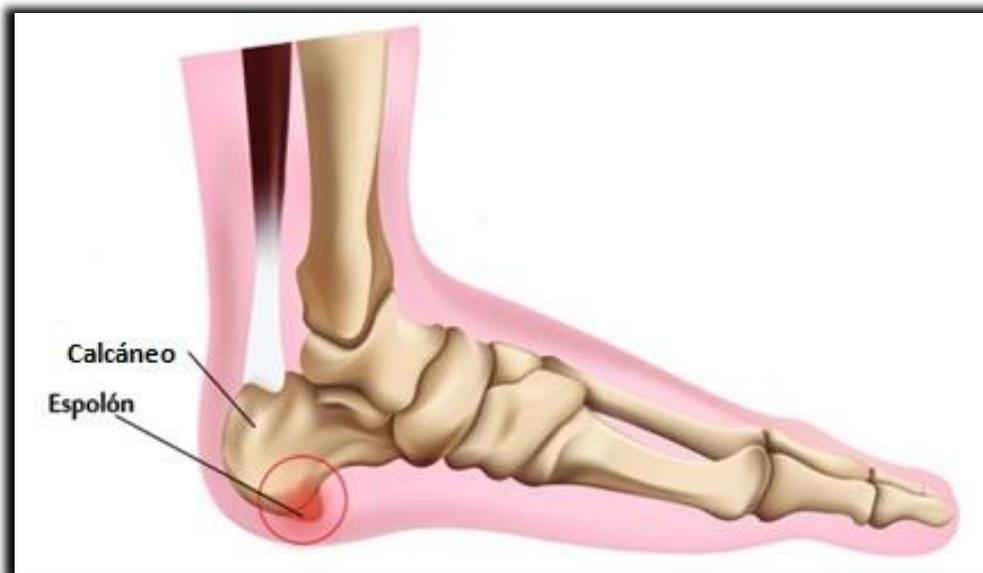
Se ha comprobado que un 50 % de los pacientes que sufren de fascitis plantar tienen espolón en el calcáneo, que resulta de la reacción a la estimulación mecánica de la fascia plantar.

A continuación, se van a presentar las fases del proceso que se han seguido y las comparativas de los resultados obtenidos en los ensayos realizados mediante el software de simulación por el método de elementos finitos, y en el que se extraen valores de resultados aproximados, que pueden valer para conocer un comportamiento semejante a la realidad en el caso de una cirugía de este tipo.

## 2. PATOLOGÍA DEL PROBLEMA DEL ESTUDIO

### 2.1. ¿QUE ES UN ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO?

El **espolón en el calcáneo** es una patología del talón que puede impedir desarrollar las actividades diarias con normalidad convirtiéndose en una molestia que puede llegar a provocar un cambio en la pisada natural de una persona. En la figura 2.1 se muestra la zona donde aparece dicha patología.



**Fig. 2.1** Espolón en el calcáneo

Para poder situar el origen de esta excrecencia ósea y empezar con los tratamientos adecuados, es esencial comprender su relación con otra patología que afecta al arco plantar y que se denomina **fascitis plantar**, la cual suele ser la principal causa por la que aparece el espolón.

Para una mejor comprensión del problema de la fascitis plantar, en primer lugar, y tal y como se muestra en la imagen de la figura 2.2, se puede apreciar la zona del pie de la que estamos hablando, y donde se encuentra la zona de inserción de la fascia plantar en el hueso calcáneo.



Fig. 2.2 Situación de la fascia plantar

La definición fascitis plantar o aponeurosis plantar designa una **inflamación de la fascia plantar**. Este fenómeno resulta de una serie de microtraumatismos en el punto de unión de esta membrana con el talón, debido a una **sobrecarga** en dicha fascia. Cuando la **inflamación perdura y se vuelve crónica**, comienza un proceso de curación espontáneo en las células óseas de la zona afectada y provocando la aparición de un pequeño espolón óseo horizontal cuya función sería la de proteger la zona dañada.

Normalmente esta **excrecencia ósea puntiaguda** se forma sobre la parte inferior del **hueso calcáneo**, perteneciente al talón, y debida a inflamación en la membrana de la fascia que conecta el calcáneo con las falanges del pie. Figura 2.3.



Fig. 2.3 Radiografía de un espolón

## 2.2. POSIBLES CAUSAS DE LA APARICIÓN DEL ESPOLÓN

Según dicen los traumatólogos y los especialistas en el tema, por lo general, esta patología la sufren una de cuatro personas aproximadamente, es decir, todos tenemos una alta probabilidad de experimentar la aparición de un espolón en el calcáneo.

La causa más habitual de la aparición de dicha patología se encuentra en la edad, aunque esta hipótesis se encuentra mermada debido a que también es común que aparezca en personas jóvenes que se ven obligadas a **pasar mucho tiempo de pie**.

En cuanto a otra de las causas más frecuentes, es la **práctica deportiva intensa**, especialmente carreras y deportes que solicitan dicha articulación del pie, como el balonmano o el baloncesto.

Como se ha comentado en el párrafo anterior, **periodos prolongados y repetidos caminando o estando de pie también contribuyen a su desarrollo**.

Además de las principales causas que se han nombrado a lo largo de este apartado, existen varios **factores que elevan el riesgo** de sufrir este tipo de patología, o que favorecen su aparición, como el **sobrepeso** o la obesidad, tener la enfermedad de los **pies planos**, usar **calzado inadecuado** para según qué tipo de actividades, y disponer de **poca elasticidad en el tendón de Aquiles**, patología muy poco probable pero que en ocasiones es la causa del espolón.

## 2.3. DIAGNÓSTICO Y SÍNTOMAS PRINCIPALES DEL ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO

Como se puede presuponer, el principal manifiesto de esta patología es un **dolor unilateral en el talón**, que se asemeja a una sensación denominada como “**pisar un clavo**”.

Aparece sobre todo con los **primeros pasos de la mañana**, dado que cuando la persona que lo sufre se encuentra sentada o descansa sus piernas, por ejemplo mientras está durmiendo, los músculos de la planta del pie se contraen para proteger la zona lesionada de la fascia dejándola protegida.

Además, el dolor se agrava **después de la práctica de actividades deportivas** puesto que la inflamación se agudiza en la zona de inserción de la fascia plantar.

Una vez que el paciente se presenta en la consulta de su especialista, en este caso sería un traumatólogo, o en la de su médico de cabecera, con algunos de estos síntomas que se han expuesto, lo primero que se realiza es una **radiografía del pie** para asegurarse de que dichos síntomas coinciden con la patología comentada.

El aspecto que tiene una radiografía de un paciente que sufre el espolón en el calcáneo es la que se muestra en la figura 2.4, donde se puede **apreciar la calcificación producida** y así poder determinar la solución más adecuada.



Fig. 2.4 Radiografía del pie con el espolón de las simulaciones

## 2.4. CONSEJOS Y SOLUCIONES PARA LA ELMINIACIÓN DEL ESPOLÓN EN EL CALCÁNEO

Como se ha comentado a lo largo de la explicación de la esta patología, se debe de prevenir primero la aparición de la fascitis plantar, ya que es la que desencadena la aparición de la posterior calcificación que se convertirá en el espolón, así que a continuación se exponen unos **consejos y tratamientos para la prevención de una posible fascitis plantar**.

### 2.4.1. TRATAMIENTOS Y PREVENCIÓN SIN CIRUGÍA

- La primera medida preventiva que se toma como solución a la fascitis plantar es **reducir la inflamación**, normalmente se consigue con una disminución de las actividades físicas traumatizantes para el talón, como por ejemplo colocar hielo una vez al día durante 10 o 15 minutos.
- **Uno de los primeros tratamientos** que aparece en todos los artículos médicos relacionados con esta patología, es el uso de **plantillas ortopédicas que alivien la tensión sobre la zona** mediante la elevación de la zona de apoyo del talón, haciendo así que los movimientos sean menos dolorosos.
- Además, se colocan unas **férulas nocturnas y unos ejercicios de estiramiento** al paciente para eliminar, en parte, el dolor de la zona plantar.
- En cuanto a tratamientos **con fármacos**, lo más común es tratarlo con **analgésicos** administrados por vía oral, o con **infiltraciones de antiinflamatorios esteroides directamente en la zona afectada**, un ejemplo claro son los jugadores profesionales de fútbol cuando se dice que “han salido a jugar al campo infiltrados”.

Como se ha comentado al comenzar este apartado, todos los tratamientos citados anteriormente, no requiere de cirugía, sino que son medidas preventivas que favorecen la disminución de la inflamación de la fascia plantar, y la disminución en el dolor para que no se convierta en un dolor crónico y de lugar a la aparición de la calcificación ósea o espolón.

**Una vez no resulten efectivas ninguna de las medidas adoptadas**, no se haya reducido el dolor durante varios meses, y el traumatólogo considere que las probabilidades de éxito de la operación son suficientes, se adoptará **eliminar la protuberancia que se ha formado mediante cirugía convencional o mediante endoscopia**, donde la incisión que se producirá será menor y se evitará el contacto con los nervios y los tendones que rodean el hueso calcáneo.

### 2.4.2. TRATAMIENTO QUIRÚRGICO DEL ESPOLÓN

El avance en las técnicas quirúrgicas ha propiciado que el espolón en el calcáneo pueda corregirse mediante una intervención quirúrgica. Esta operación consiste en la **eliminación total del espolón con una mínima incisión de dos o tres milímetros en la piel, hasta llegar a la prominencia ósea**, y así poder eliminarla para que la curva plantar sea la adecuada y no se produzca molestia en la pisada.

No precisa de anestesia general ni de ingreso del paciente, sino que podrá salir caminando por su propio pie después de la intervención.

Esta técnica de cirugía percutánea se engloba en la **cirugía de tipo mínimamente invasiva**, muy desarrollada en los últimos años, puesto que tiene una mejor recuperación y deja cicatrices más pequeñas y con periodos más rápidos de curación. Figura 2.5.



Fig. 2.5 Ablación del espolón con cirugía mínimamente invasiva

**La intervención quirúrgica de resección**, es decir, desinsertar primero la fascia de su lugar de origen, y volviéndola a insertar en el hueso una vez se ha eliminado la calcificación, no siempre concluye con el alivio total del dolor y puede originar complicaciones aunque el porcentaje de éxito ronde el 90 %, por lo que solo se considera indicada en situaciones de fracaso total de los tratamientos terapéuticos.

Es una técnica más complicada que la anterior y la operación requiere de una mayor complejidad, en cuanto a la incisión y a la intervención en sí, tal y como se puede apreciar en la imagen de la figura 2.6.

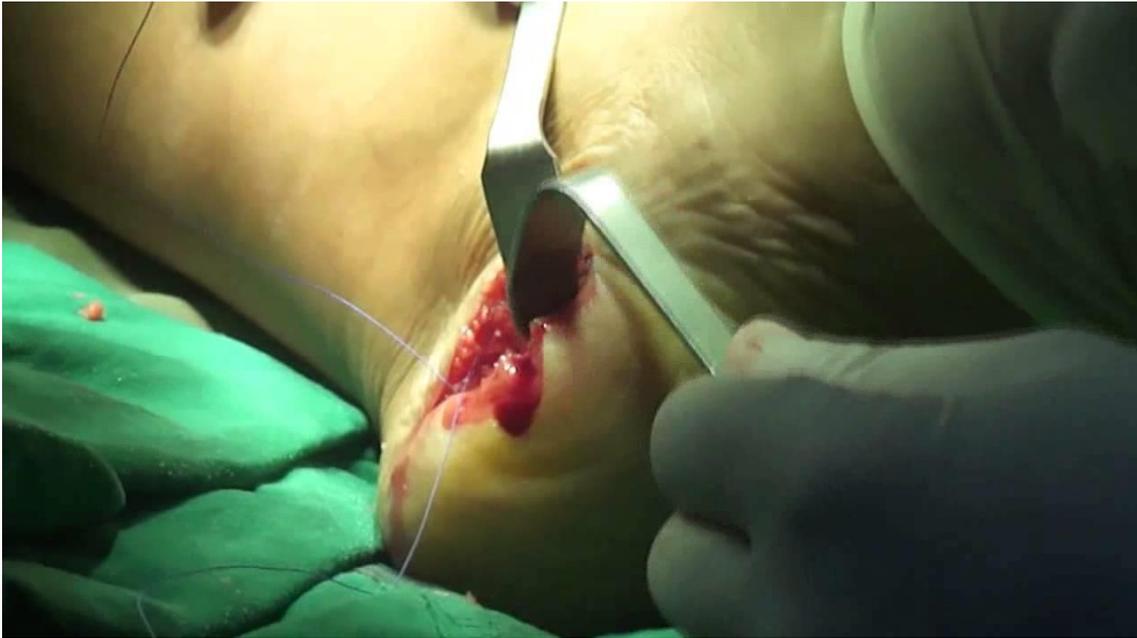


Fig. 2.6 Intervención quirúrgica de eliminación de espolón mediante resección

## 2.5. RESULTADO DEL ESPOLÓN TRAS INTERVENCIÓN QUIRÚRGICA DE ELIMINACIÓN

Cuando se realiza la intervención quirúrgica de eliminación del espolón mediante el método de resección, es decir, en la que **se necesita desencajar la fascia en primer lugar para así poder operar y retirar la calcificación**, se debe de ser muy preciso en la incisión y en la cantidad de material óseo que se le retira al paciente.

En la siguientes dos imágenes que se muestran Fig. 2.7 y Fig. 2.8, se puede apreciar una **calcificación real retirada** a un paciente que tenía un problema en el apoyo del pie, el cual resultó ser un espolón.

No se pueden establecer unas medidas exactas de anchura, altura y profundidad, dado que los diferentes casos de los pacientes, **estas medidas varían en función de la edad, del tiempo de molestia hasta que se retiran, y del comportamiento óseo de recuperación y de ataque a la calcificación de cada organismo.**

En este estudio, nos hemos basado en una estimación de las medidas basadas en pacientes de una clínica de Madrid, donde se ha intentado reproducir las dimensiones de la calcificación con la mayor precisión posible.

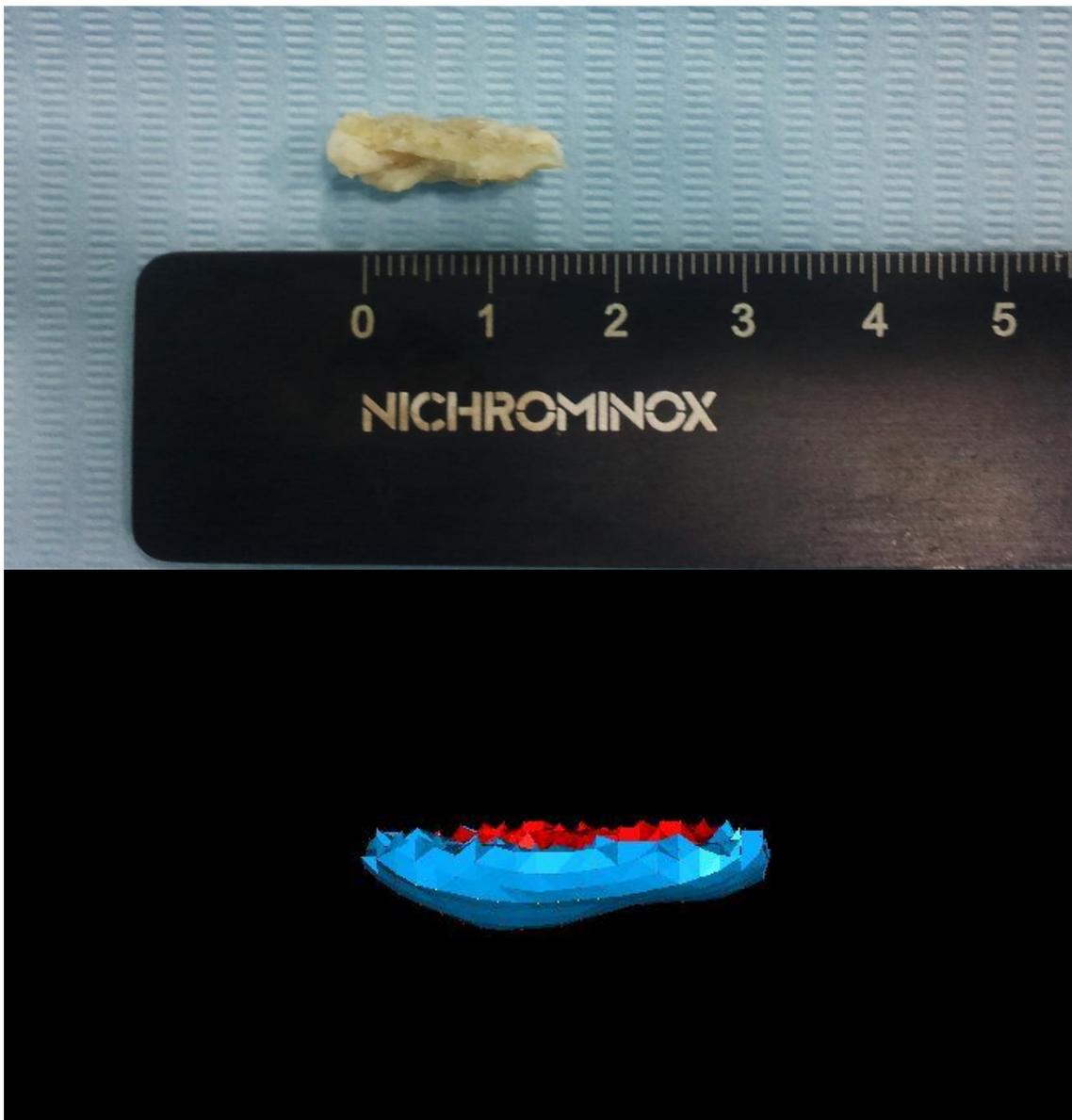


Fig. 2.7 Vista perfil espolón real eliminado y reproducción mallada NX I-DEAS

Como podemos ver en las imágenes ampliadas del software, no es fácil reproducir al milímetro una calcificación real, pero se puede apreciar como elemento a elemento se puede aproximar a la realidad para darle una mayor consistencia a las simulaciones.

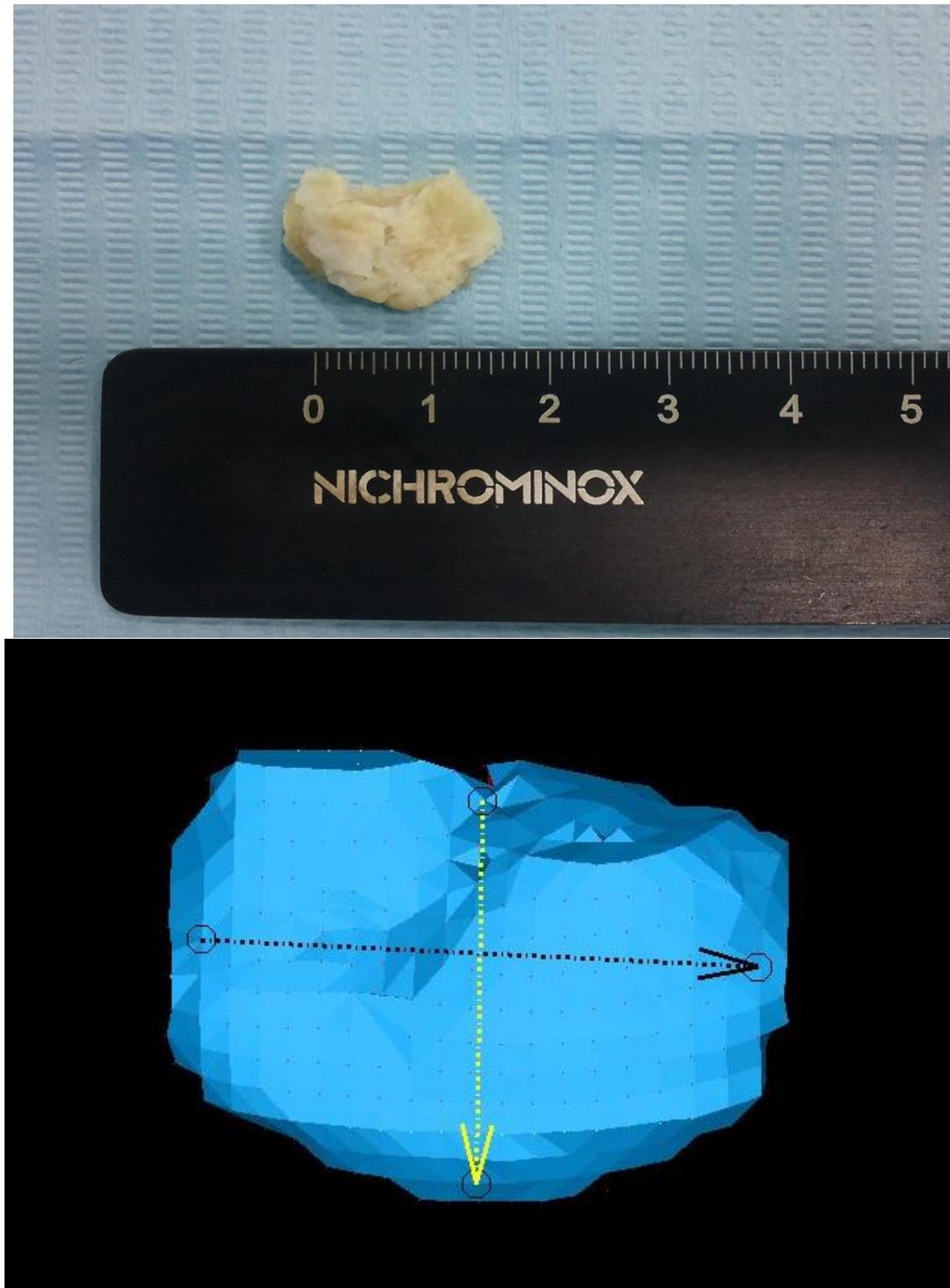


Fig. 2.8 Vista en planta del espolón eliminado y reproducción mallada NX I-DEAS

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LA MALLA Y SOLICITACIONES PARA LOS MODELOS

Antes de empezar a explicar la manera en la que se ha realizado el estudio completo y como se han ido obteniendo todos los resultados, cabe destacar que se van realizar **dos partes** claramente diferenciadas, en este caso, dicha diferencia radica en el **modelo de pie y las características tanto de apoyo, como de la forma y en la manera en que se aplican las solicitaciones de los diferentes casos analizados.**

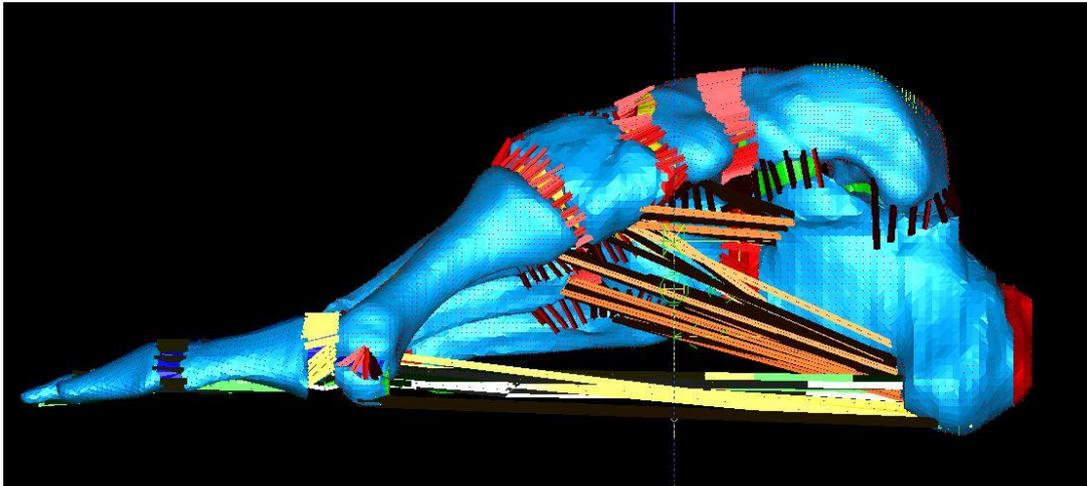
Como se ha comentado existen dos modelos en los que se ha trabajado: el **modelo denominado “Pie Apoyado”**, que como su propio nombre indica, el pie se encuentra de manera plana apoyado tanto en las falanges delanteras como en el talón, **y el modelo llamado “Pie Puntillas”**, el cuál se presenta como un modelo apoyado solamente en las falanges delanteras y con la parte del talón en el aire, teniendo que añadir ciertas condiciones en el ensayo para que el modelo converja, dado que sin ellas, el pie quedaría en el aire sin poder obtener resultados coherentes.

#### **3.1. DISEÑO DE LA MALLA MODELO “PIE APOYADO” Y CONDICIONES PARA LAS SIMULACIONES**

Como se ha citado en la introducción de este apartado, **el primer modelo se encuentra apoyado en la posición de forma totalmente plana**, y reproduciendo al máximo, apoyos en la parte de las falanges delanteras, y en el talón, es decir, simulando la **posición que resulta de estar de pie y de manera erguida.**

Se ha comenzado con una malla que ya había diseñada y proporcionada por el director del proyecto, Dr. Javier Bayod López, sobre la cual se han realizado otro tipo de simulaciones y estudios, y la cual se compone de un gran número de grupos de elementos, diseñados mediante el **software “NX-I DEAS”**, en el que se reproduce el pie con una gran semejanza a uno real, y cuyo programa de simulación permite una amplia gestión de los diferentes grupos de elementos, con la posibilidad de tratarlos de manera independiente, y lo que facilita poder **reproducir la simulación de la cirugía practicada en la operación citada, y la eliminación de los elementos barra que representan la fascia y su inserción en el hueso calcáneo, y partes de los ligamentos finos que quedarían desanclados de la zona ósea eliminada**, y que producirían algo de desajuste en los resultados de tensiones y desplazamientos.

En la siguiente ilustración, Figura 3.1, se puede observar el **modelo del “Pie Apoyado” con todos los grupos y los subgrupos de elementos que lo componen**, y donde se pueden ver toda la **parte ósea** (coloreada en azul lo que sería el hueso cortical, y en rojo la parte de hueso esponjoso) y las **partes blandas** (coloreadas en amarillo, verde, naranja y negro), que simulan todos los ligamentos duros y blandos que unen los músculos de los dedos con los huesos, las fascias e inserciones y los tendones, para que en conjunto, el modelo se aproxime lo máximo posible y salgan unos resultados coherentes.



**Fig. 3.1 Malla del modelo “Pie Apoyado” software NX I-DEAS**

Un aspecto a destacar, de cara a las simulaciones, es el **tema de los apoyos y como simular que el pie se encuentra totalmente sujeto al suelo**. En este modelo se tienen dos puntos de apoyo con el suelo, el primero es en la **parte de abajo del calcáneo**, es decir, el talón, y el segundo apoyo corresponde con el **apoyo metatarsal**, para que una vez aplicadas las cargas de las simulaciones, no se deforme el modelo de manera inadecuada. Figura 3.2.



**Fig. 3.2 Disposición de los apoyos en el modelo Pie Apoyado**

Dado que una vez retirada la materia ósea tras la operación, el apoyo del talón se hará en puntos diferentes a los del modelo original, además de que **algunos de los nodos que componen el grupo de apoyo original se encuentran en la parte de calcáneo eliminada, por lo que se tendrán que redefinir** nuevos nodos y aplicar allí las condiciones de los desplazamientos.

Como se puede imaginar, **las condiciones en el apoyo metatarsal no cambian** a lo largo de las simulaciones, puesto que no se realiza ninguna intervención en esa parte del pie, que pueda afectar a ese grupo de nodos que componen el apoyo.

### 3.1.1. DISEÑO DEL MATERIAL ÓSEO RETIRADO

El siguiente paso es intentar simular el trozo de hueso que se opera quirúrgicamente y el cual se intervendría para quitar el espolón.

En este caso, **el trozo óseo se ha dividido en 3 capas de una profundidad más o menos similar, para poder establecer las comparaciones por capas**, atendiendo a las diferentes solicitaciones que se van a ensayar.

Se han establecido 3 capas porque en función del paciente y del tamaño del espolón, se retira una cantidad diferente de hueso. No está establecido que cantidad se debe retirar, si no que el cirujano que practica la intervención debe decidirlo.

No es una tarea fácil, ya que si no elimina suficiente material, puede reaparecer dicha calcificación y volver a producir molestias.

Como se puede comprobar en el modelo del software de diseño, es una tarea compleja ser exactos con las medidas que se asemejan a la realidad, pero **se intenta reproducir al máximo las capas que se van retirando en este tipo de cirugías**, atendiendo al trozo de material óseo que se proporcionó en el estudio y que procedía de un ejemplo real realizado por un cirujano de la comunidad autónoma de Madrid.

En la siguiente imagen, Figura 3.3, se muestra como se ha descompuesto en las 3 capas citadas el total de material óseo retirado:

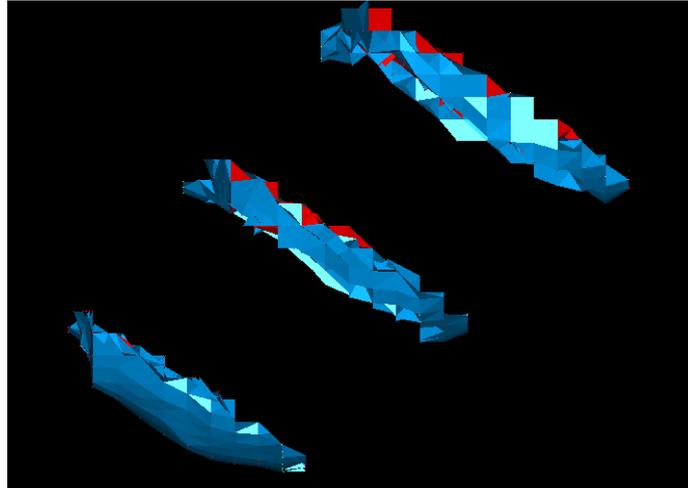


Fig. 3.3 Capas del material óseo retirado “Pie Apoyado”

El resultado del hueso calcáneo, una vez retiradas las 3 capas que se han mostrado justo en la imagen superior sería el siguiente:

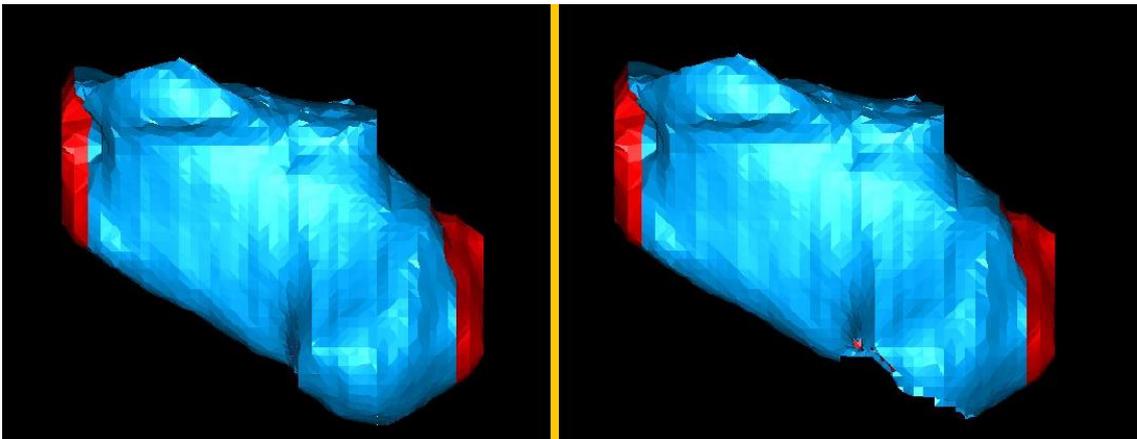


Fig. 3.4 Resultado hueso calcáneo con material retirado “Pie Apoyado”

### 3.1.2. CARGAS Y SOLICITACIONES

En este estudio, la manera de **simular el peso o sollicitación que sufre el pie**, se realiza a través de una **carga de tipo vertical pero con una leve inclinación de unos 10 grados con la normal**, que sería el eje dirección de la pierna cuando el cuerpo se encuentra totalmente erguido.

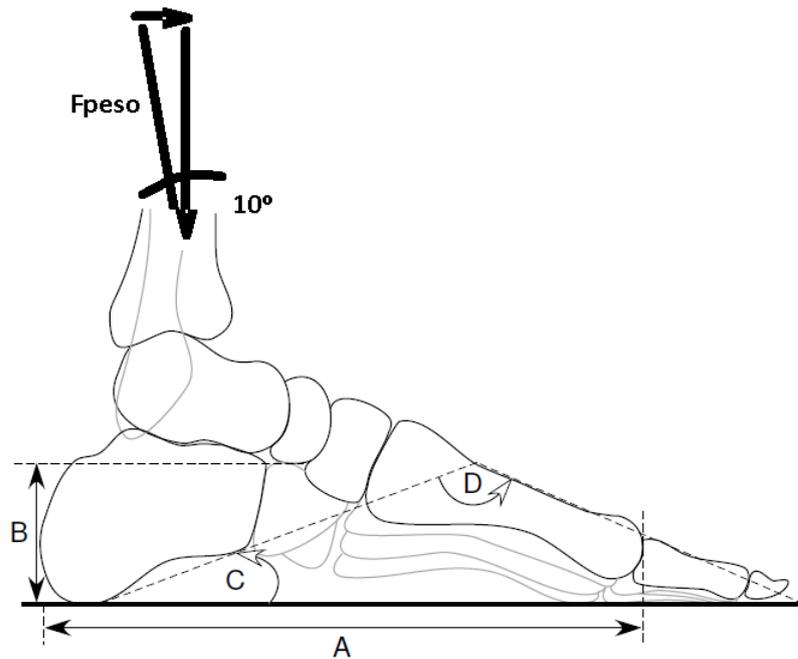


Fig. 3.5 Definición y composición de las cargas aplicadas

Además de la carga que representa el peso del cuerpo sobre los pies, se va a definir **una carga tractiva en la parte del tendón de Aquiles** que corresponde a la **fuerza de sujeción que ejerce dicho ligamento y cuyo esfuerzo está presente en cualquiera de los movimientos del pie.**

Como veremos en el modelo de “Pie Puntillas”, esta carga no es significativa debido a que se simula justo el instante que se va a iniciar el levantamiento del pie en la acción de dar un paso.

Estos son los tres casos de carga para el modelo del pie apoyado:

- **CASO 1:** se simula una carga de una persona de unos 60 kg aproximadamente, lo cual se traduce en 600 N de peso, o lo que es lo mismo, **300 N de carga en cada pierna.**

En este caso se va a aplicar una **carga constante ejercida en el tendón de Aquiles de 150 N.**

Se simula el modelo original en estas condiciones, después el modelo sin la primera capa definida. Una tercera simulación sin las capas 1 y 2. Y por último, se simula el modelo sin las 3 capas que compondrían la parte ósea total retirada en la cirugía.

- **CASO 2:** En este segundo caso se va a variar la carga en cada pierna, manteniendo **constante la carga aplicada en el tendón de Aquiles de 150N.**
  - **CASO 2.1:** se va a aplicar una **carga sobre el hueso astrágalo**, perteneciente al peso del cuerpo de la persona en el instante en que podría ejercer todo el peso sobre una pierna, es decir, **600 N** en una pierna.
  - **CASO 2.2:** una simulación con el aumento de la **carga sobre el astrágalo hasta 750 N** en una pierna, que sería el extremo de este caso.
  
- **CASO 3:** Por último, en este caso lo que **se va a mantener constante es la carga sobre el astrágalo de 300 N** en cada pierna, lo que correspondería también a una persona de unos 60 kg aproximadamente.
  - **CASO 3.1:** se aplica una **carga de tracción sobre el tendón de Aquiles de 300 N.**
  - **CASO 3.2:** se aumenta la **carga sobre el tendón de Aquiles a 375 N**, manteniendo también la carga sobre el astrágalo.

### **3.2. DISEÑO DE LA MALLA MODELO “PIE PUNTILLAS” Y CONDICIONES PARA LAS SIMULACIONES**

A continuación se va a mostrar el segundo **modelo del estudio denominado “Pie Puntillas”**, como se puede apreciar en la Figura 3.6, el modelo es ligeramente parecido al primero, en cuanto a los grupos de elementos y la disposición de los mismos, pero como se ha comentado en apartados anteriores, en este caso **el pie no se encuentra de forma plana con respecto al suelo, si no que el apoyo con el suelo sólo se daría en la parte de las falanges delanteras**, por lo que el talón quedaría en el aire, simulando la situación de dar un paso, es decir, el instante justo antes de despegue del suelo.

Este modelo también ha sido proporcionado por el director del presente proyecto, y ha sido utilizado en otras simulaciones pertenecientes a otros estudios relacionados con patologías de pie.

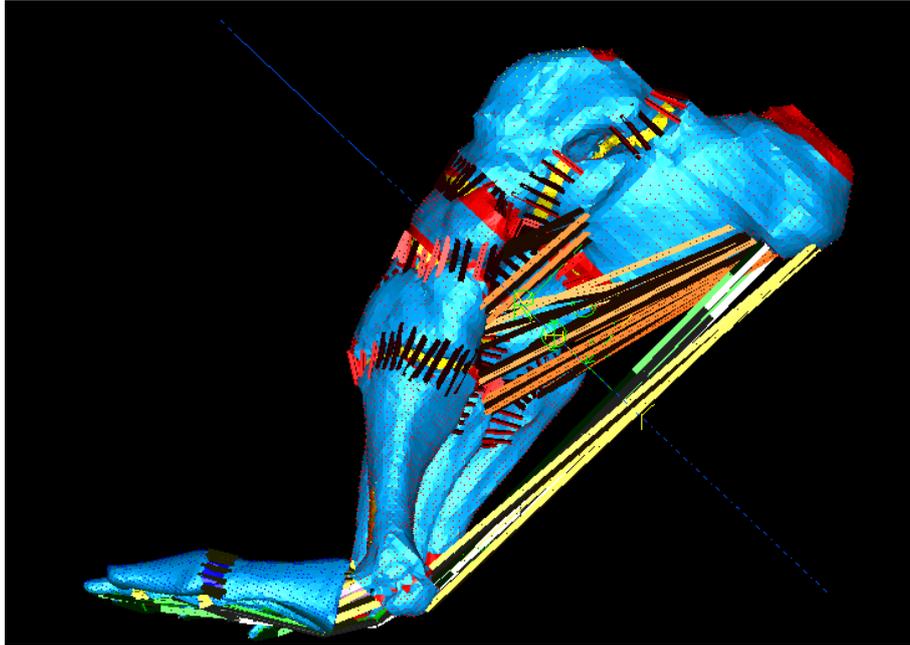


Fig. 3.6 Malla del modelo “Pie Puntillas” software NX I-DEAS

En este caso, los apoyos son diferentes al primer modelo, ya que en una simulación del pie justo en el momento antes de dar el paso, llamado “despegue”, se encuentra apoyado solo en la parte delantera del pie, y que se traduce en **3 apoyos claramente definidos en el modelo.**

**En primer lugar, se define unos nodos de apoyo situados en la falange delantera, otro grupo de nodos situados en la siguiente falange, y el tercero y más importante, el grupo situado en el primer metatarsiano, que comparte nodos con el apoyo metatarsal que se utiliza en el otro modelo del estudio.**



Fig. 3.7 Situación del apoyo del pie en posición de despegue

### 3.2.1. DISEÑO DEL MATERIAL ÓSEO RETIRADO

El siguiente paso es intentar simular el trozo de hueso que se opera quirúrgicamente y el cual se intervendría para quitar el espolón. Como se ha detallado en el modelo “Pie Apoyado”, la manera de ejecución es exactamente la misma, además **se han intentado mantener las mismas medidas de las 3 capas de profundidad que conforman el total de material óseo retirado en la intervención.**

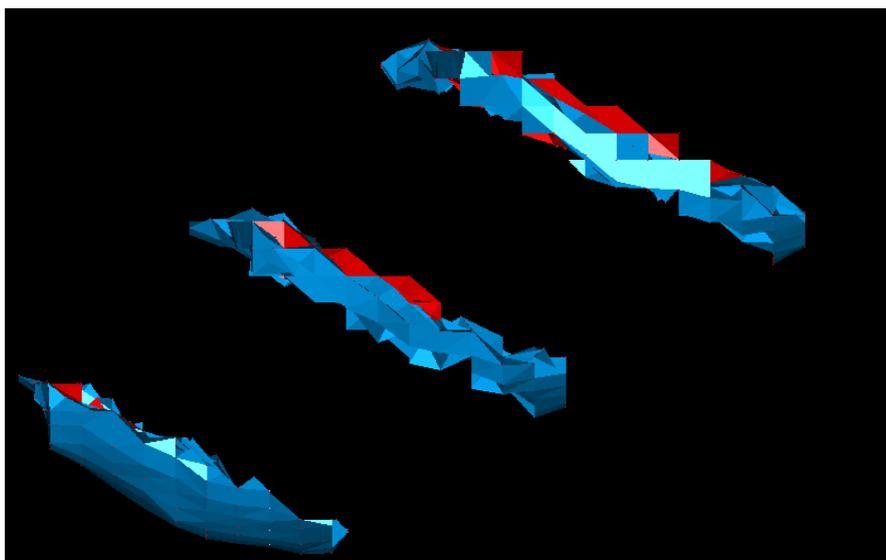


Fig. 3.8 Capas del material óseo retirado “Pie Puntillas”

Una vez se eliminadas las 3 capas definidas, **el resultado del hueso calcáneo** en este modelo de elementos finitos quedaría de la siguiente forma:

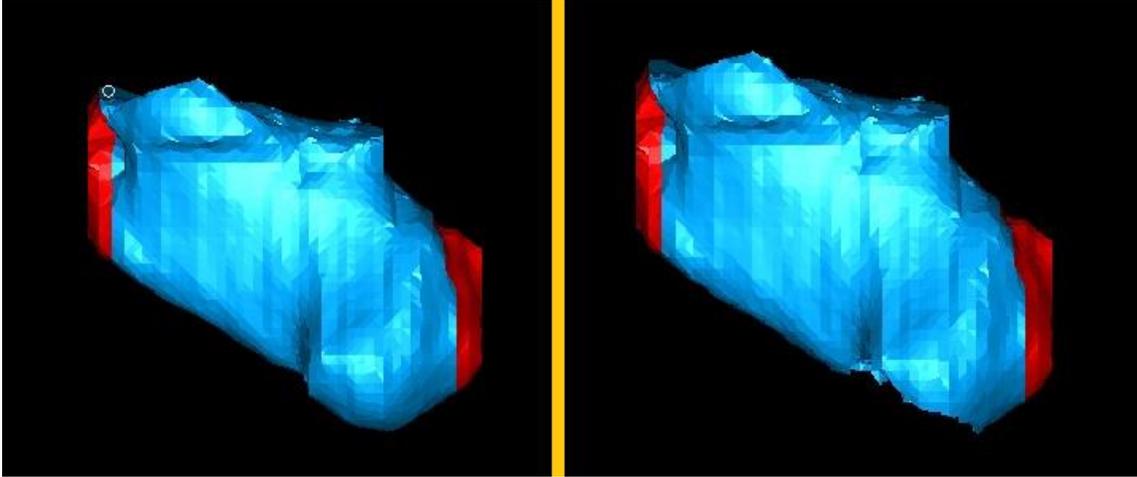


Fig. 3.9 Resultado hueso calcáneo con material retirado “Pie Puntillas”

### 3.2.2. CARGAS Y SOLICITACIONES

En este modelo no se aplica la carga sobre el tendón de Aquiles, sino que se impone una condición de sujeción para que el talón no quede descolgado, por lo que sólo se simula la carga que se produce sobre el astrágalo en el instante en el que el pie se encuentra apoyado solamente en la parte de las falanges.

Como se puede suponer, y al encontrarnos en otra fase de la marcha humana, **la carga va a ser diferente a la del anterior modelo**, ya que se debe contemplar que al ser el instante del despegue, el peso del paciente no está repartido equitativamente, por lo que estos valores de carga serán muy superiores a los del modelo “Pie Apoyado”.

Estos son los datos aplicados en las 3 situaciones de carga del pie de puntillas:

- **CASO 1:** este es el caso de menor solicitación, la **carga aplicada sobre el hueso astrágalo es de unos 1800 N.**
- **CASO 2:** en esta segunda simulación se aplica una **carga sobre el astrágalo de unos 3600 N.**
- **CASO 3:** para **comprobar un caso crítico** que nos permita también cotejar las conclusiones, por ejemplo el caso de una mala pisada o de la iniciación de un salto, se aplica **una carga de 4500 N** sobre el hueso astrágalo.

### 3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DEL MODELO

Además de definir todas las condiciones que se van a realizar en las simulaciones, y las cargas que se van a imponer, **otro aspecto importante es la caracterización de los materiales que intervienen en el modelo, compuesto en su mayor parte por tejido óseo, pero donde intervienen también tejidos blandos** que se corresponden con los ligamentos, las fascias y los tendones que tiene el pie.

Como se puede suponer, **estos materiales no tienen las mismas propiedades mecánicas**, sobre todo hay que prestar **especial atención en la diferencia que existe entre el tejido óseo trabecular**, también llamado esponjoso y que corresponde a la parte central del hueso, **y el tejido óseo cortical**, que es el que rodea al trabecular y le da una mayor resistencia y dureza al hueso.

Para las simulaciones en el software de elementos finitos, **se han tomado todos los materiales con un comportamiento elástico e isótropo**. Las propiedades de los mismos se han establecido de acuerdo a los valores que se habían tomado en estudios anteriores del pie, y realizados con este mismo modelo, pero basados en otro tipo de patologías o con diferentes objetivos de estudio.

A continuación se van a mostrar los **valores de los módulos de Young y de los coeficientes de Poisson utilizados**, que se corresponden con los principales parámetros con los que se caracteriza este tipo de modelo de comportamiento del material:

Tabla 1 Caracterización de los materiales del modelo

	<b>Módulo de Young, E (Mpa)</b>	<b>Coefficiente de Poisson, U</b>
Hueso cortical	17000	0.3
Hueso esponjoso	700	0.3
Fascia	350	0.3
Ligamentos flexores	450	0.3
Ligamentos finos	260	0.3
Cartílago	10	0.4

## **4. SIMULACIÓN MEDIANTE M.E.F Y RESULTADOS**

### **4.1. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

A continuación se va a detallar el proceso que se ha seguido para la obtención de los resultados y como se ha procedido en los diferentes software utilizados en el estudio.

Como se ha explicado en los anteriores capítulos, disponemos de dos modelos completamente independientes a la hora de trabajar con ellos, y que se han tomado como referencia de los primeros resultados de los cálculos en cuanto a deformaciones y tensiones.

Una vez definidos los grupos de elementos que intervienen y que componen cada uno de los modelos en el programa NX I-DEAS, se ha pasado a definir los apoyos correspondientes a cada modelo y se ha tomado el caso de carga inicial, sin retirar ningún tipo de material óseo, por lo que se lanza el cálculo en ABAQUS obteniendo los primeros resultados.

El siguiente paso ha sido diseñar las modificaciones que se iban a realizar en las mallas adaptadas al estudio, es decir, definir qué medidas va a tener el material óseo que se retira y que simula la intervención en el espolón, y la redefinición de los apoyos o situaciones de apoyo, puesto que hay que definir un nuevo apoyo en el talón debido a la desinserción de la fascia, ya que si no, el modelo no converge a la hora de lanzar dichos cálculos.

Una vez bien definidas las capas, los apoyos, y las sollicitaciones de carga en que se ha basado el estudio, se procede al lanzamiento de todos esos casos, teniendo en cuenta la cantidad de material óseo retirado en la cirugía, que tal y como se ha detallado a lo largo del proyecto, cuenta con 3 capas que conforman toda la profundidad de la parte ósea total a extraer en la intervención.

Una vez convergen todos los cálculos, se realizan las comparativas correspondientes y que nos permitirán la obtención de las conclusiones del estudio realizado, utilizando las variables más representativas, que en este caso son las tensiones del modelo, sobre todo en el hueso calcáneo, tanto de tracción como de compresión, y los desplazamientos que se producen para ver cómo afectaría retirar la parte ósea y que profundidad tendría una mayor repercusión en los resultados de las simulaciones.

## 4.2. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL MODELO “PIE APOYADO”

Para una buena interpretación de los resultados, es importante tener en cuenta las direcciones que toman las cargas y la disposición de los ejes en los que se evalúan los resultados de las simulaciones.

En la Figura 4.1 se puede ver como la dirección que representa el eje Y se corresponde al eje perpendicular al suelo, en el cual viene aplicada la carga sobre el hueso astrágalo que se encuentra inmediatamente sobre el hueso calcáneo, y que es debida al peso de la persona.

También toma importancia la dirección tomada como eje Z, en la que tiene componente la descomposición de la carga debida al peso, ya que como se ha comentado en el apartado anterior, se toma con una inclinación de unos 10 grados con el eje vertical y de sentido contrario a la dirección antero-posterior, es decir, la carga y las tensiones generadas por dicho esfuerzo, tendrán valores negativos en esa dirección.

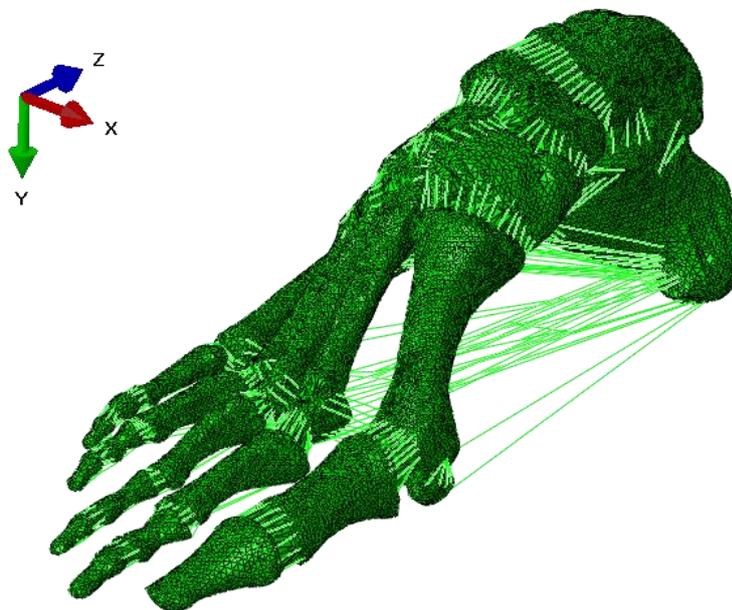


Fig. 4.1 Modelo de elementos finitos y representación de ejes “Pie Apoyado”

#### 4.2.1. RESULTADOS DE TENSIONES DE COMPRESIÓN Y TRACCIÓN

A continuación se van a exponer los resultados gráficos y una tabla con los valores numéricos de las tensiones y los desplazamientos obtenidos en las simulaciones.

Debido a que caso de carga cuenta con 4 simulaciones para las diferentes profundidades de material óseo retirado, es inviable colocar todas las ilustraciones, así que se ha detallado uno de los casos de carga, y en los demás casos, sólo se ilustra la comparativa de resultados del modelo original con el caso más crítico. El resto de imágenes se encuentran expuestas en el Anexo A.

A continuación se muestran los resultados de las tensiones, tanto de tracción como de compresión, y de los desplazamientos, ya sean en el eje vertical y en el eje antero-posterior del caso seleccionado.

Para el **modelo de “Pie Apoyado”** se ha tomado el **Caso de Carga 1**, donde se aplican **300 N en el hueso astrágalo y 150 N en el tendón de Aquiles**.

Así queda la **evolución de las tensiones de tracción** según la cantidad de material óseo retirado, que se han obtenido mediante el software de simulación “ABAQUS”.

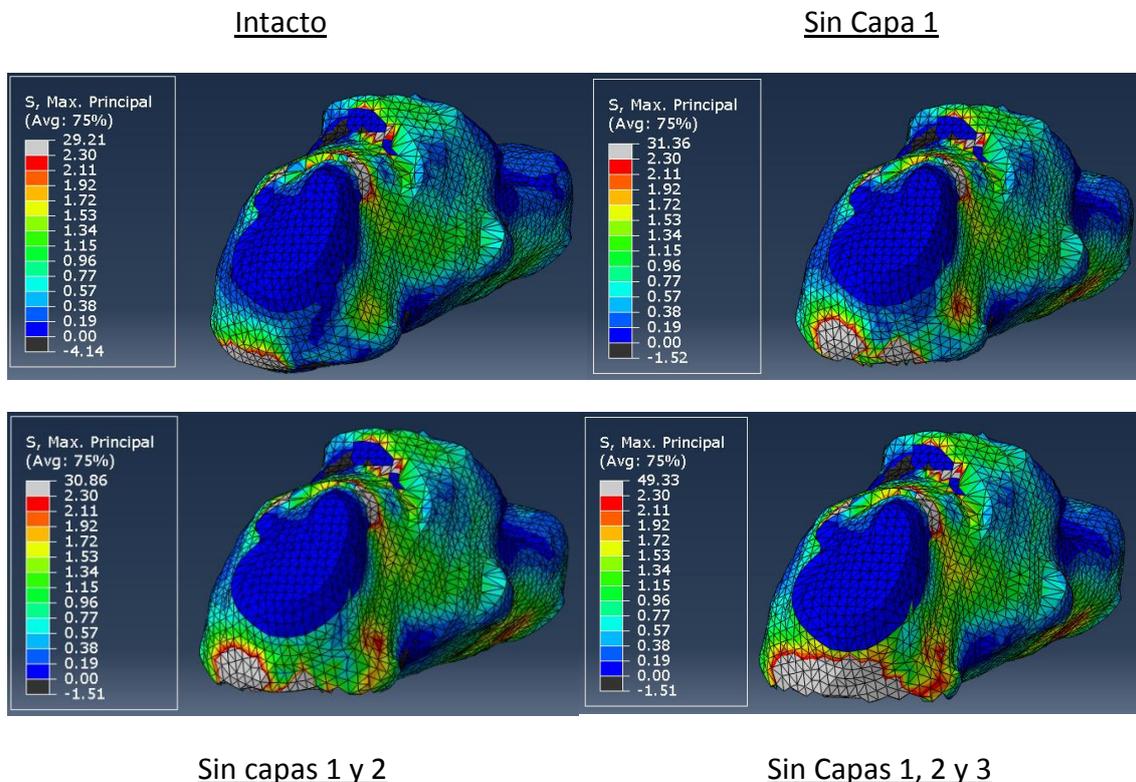


Fig. 4.2 Resultado de las tensiones de tracción para el Caso de Carga 1

Del mismo modo, se analiza también cómo evolucionan los resultados de las tensiones de compresión en el caso de carga en el que nos encontramos.

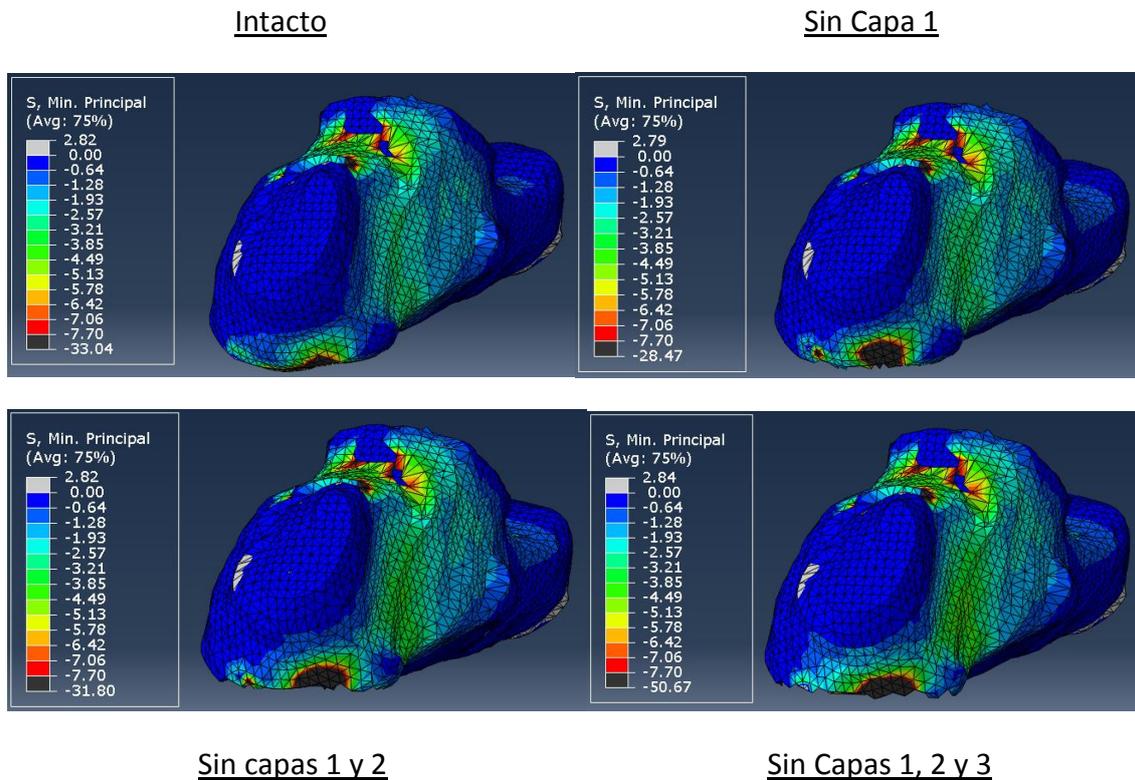


Fig. 4.3 Resultado de las tensiones de compresión para el Caso de Carga 1

Tal y como se ha comentado al principio de este apartado, para los demás casos de carga se muestra el modelo original sin retirar material óseo y el caso más crítico:

- **Caso de Carga 2.1:** se carga el tendón de Aquiles con 150 N y 600 N en el hueso astrágalo.

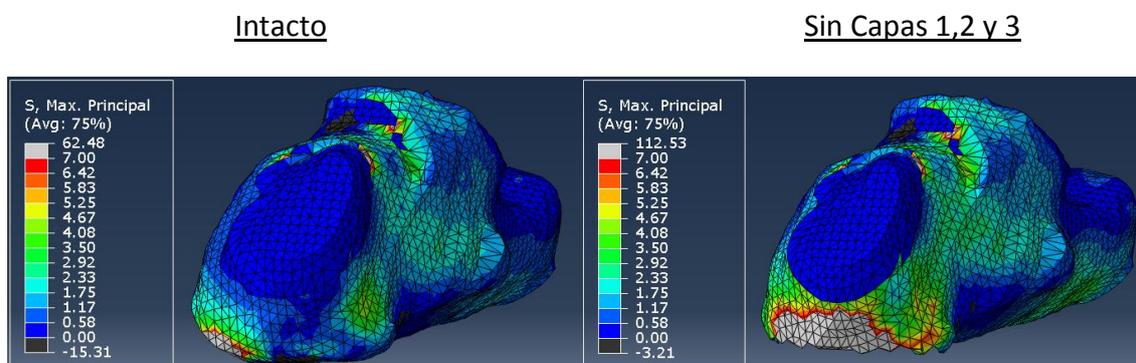


Fig. 4.4 Resultado de las tensiones de tracción para el Caso de Carga 2.1

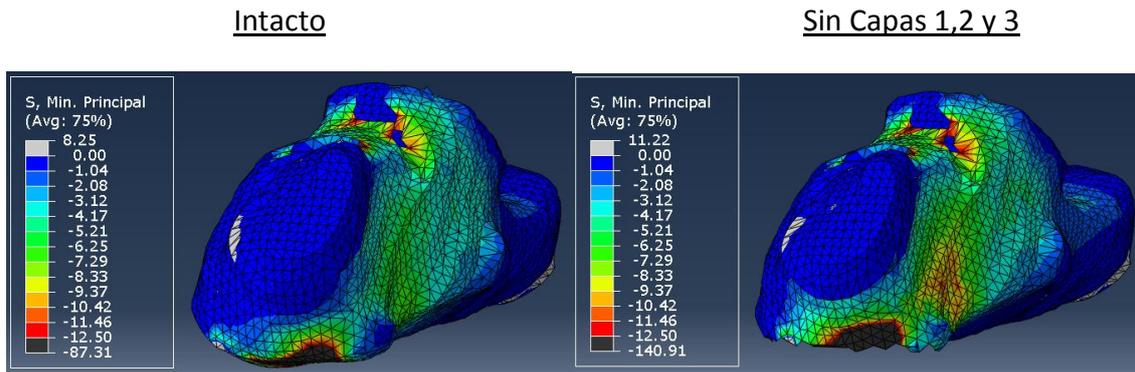


Fig. 4.5 Resultado de las tensiones de compresión para el Caso de Carga 2.1

- **Caso de Carga 2.2:** se carga el tendón de Aquiles con 150 N y 750 N en el hueso astrágalo.

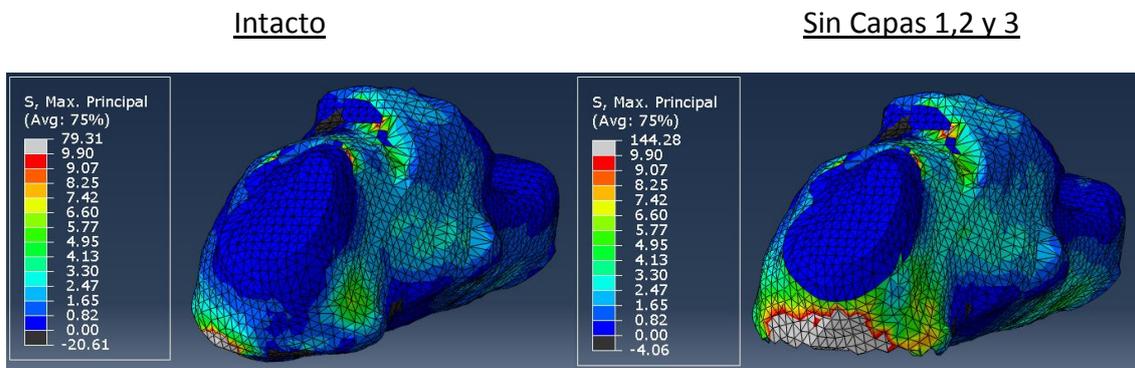


Fig. 4.6 Resultado de las tensiones de tracción para el Caso de Carga 2.2

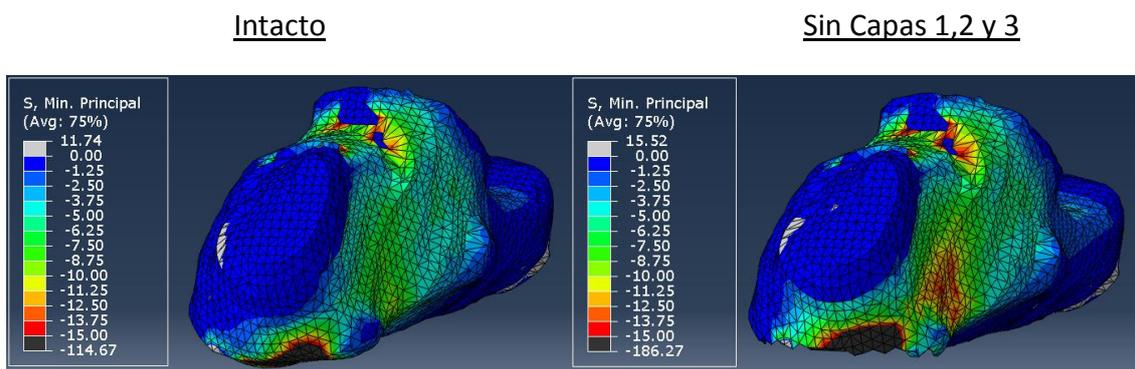


Fig. 4.7 Resultado de las tensiones de compresión para el Caso de Carga 2.2

- **Caso de Carga 3.1:** se carga el tendón de Aquiles con 300 N y 300 N en el hueso astrágalo.

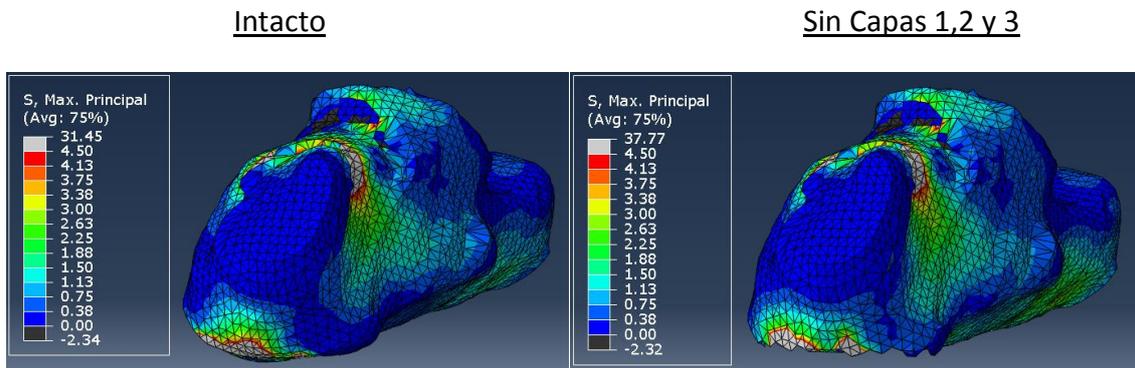


Fig. 4.8 Resultado de las tensiones de tracción para el Caso de Carga 3.1

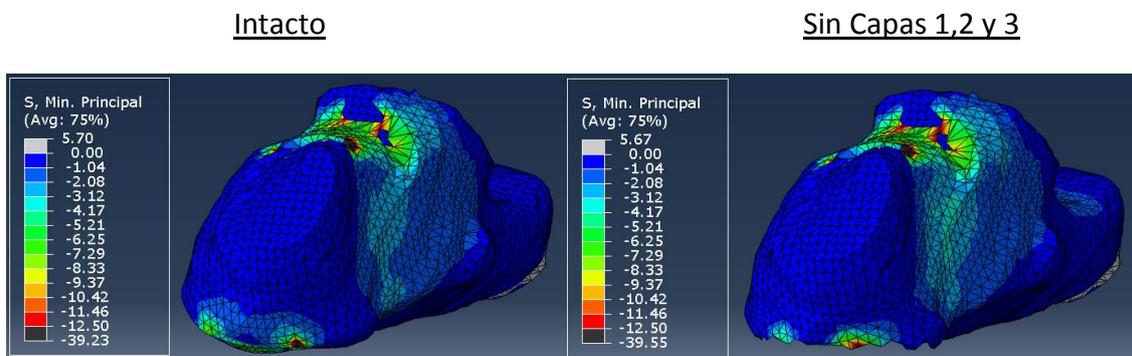


Fig. 4.9 Resultado de las tensiones de compresión para el Caso de Carga 3.1

- **Caso de Carga 3.2:** se carga el tendón de Aquiles con 375 N y 300 N en el hueso astrágalo.

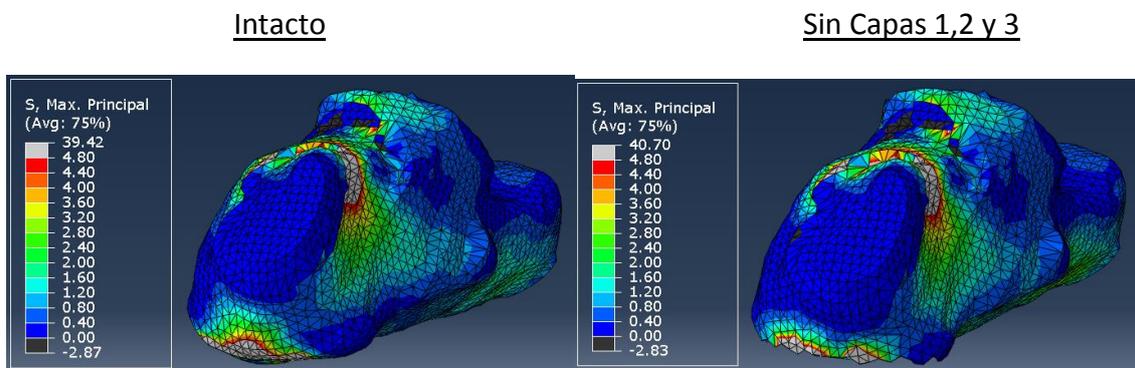


Fig. 4.10 Resultado de las tensiones de tracción para el Caso de Carga 3.2

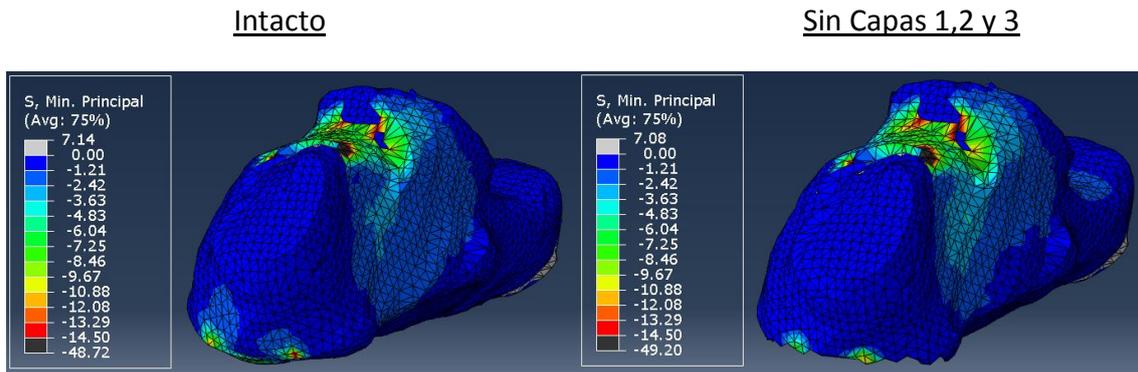


Fig. 4.11 Resultado de las tensiones de compresión para el Caso de Carga 3.2

#### 4.2.2. RESULTADOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS

Se ha elegido el caso más significativo, en este caso la simulación donde se ha cargado el tendón de Aquiles con una tensión de 150 N, y en el hueso astrágalo se han aplicado 600 N.

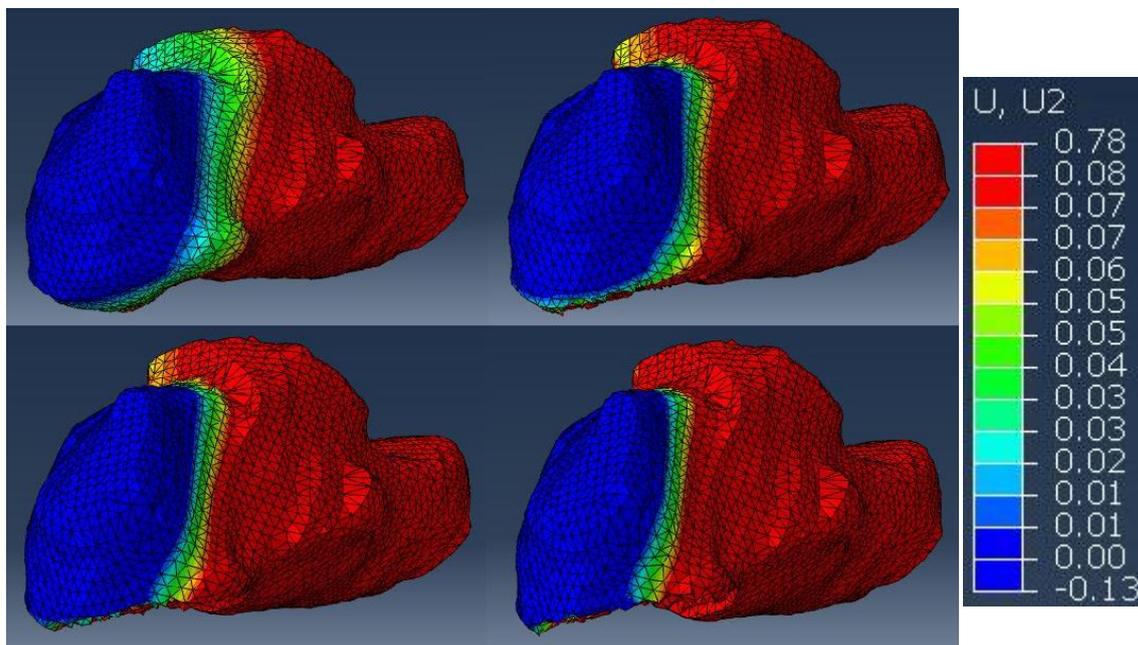


Fig. 4.12 Desplazamientos en el eje vertical Caso de Carga 2.1

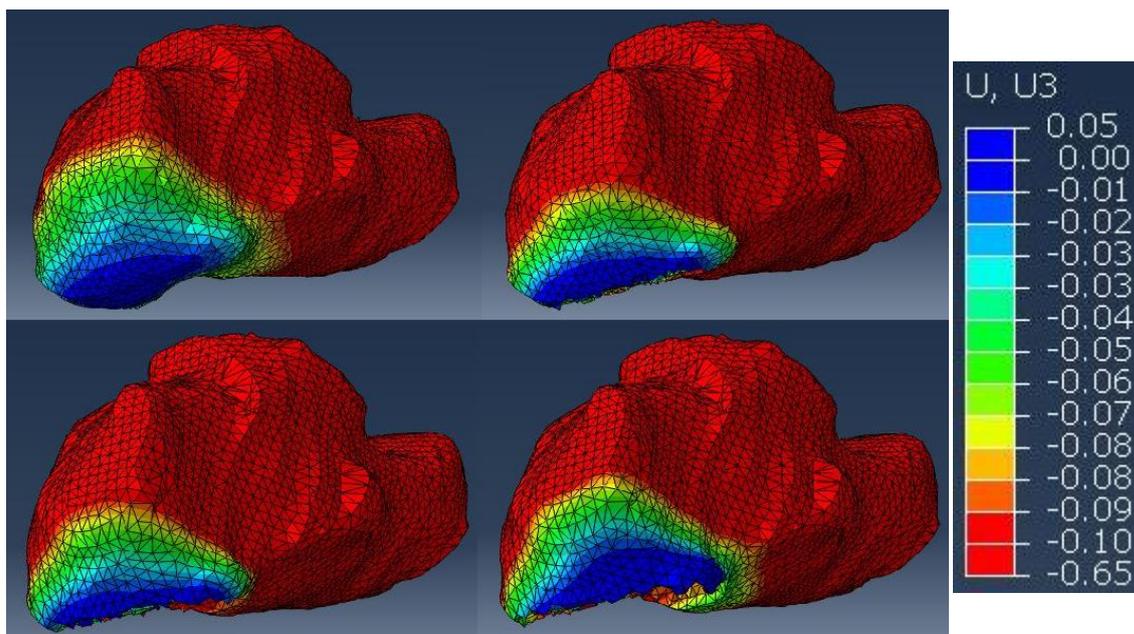


Fig. 4.13 Desplazamientos en el eje Antero-Posterior Caso de Carga 2.1

## 4.2.3. RESUMEN DE COMPARATIVA Y RESULTADOS

Tabla 2 Cuadro resumen de los resultados modelo "Pie Apoyado"

Carga Tendón de Aquiles	Carga en Talón (Astrágalo)	Tensiones (Mpa)		Desplazamiento (mm)		Capa ósea retirada
		Tracción	Compresión	Eje y	Eje z	
150 N	300 N	2.30	-7.06	0.21	-0.22	Intacto
		2.70	-8.25	0.40	-0.40	1 Capa
		3.85	-9.20	0.41	-0.40	2 Capas
		4.10	-9.60	0.43	-0.40	3 Capas
150 N	600 N	6.42	-11.46	0.36	-0.34	Intacto
		6.85	-12.70	0.70	-0.67	1 Capa
		7.10	-13.25	0.72	-0.66	2 Capas
		8.5	-14.5	0.78	-0.65	3 Capas
150 N	750 N	9.90	-13.75	0.43	-0.40	Intacto
		10.60	-15.13	0.85	-0.80	1 Capa
		10.70	-15.60	0.87	-0.79	2 Capas
		12.50	-16.15	0.95	-0.78	3 Capas
300 N	300 N	4.50	-12.5	0.28	-0.32	Intacto
		4.70	-12.80	0.50	-0.54	1 Capa
		4.70	-12.90	0.51	-0.54	2 Capas
		5.20	-13.50	0.52	-0.55	3 Capas
375 N	300 N	4.80	-14.50	0.31	-0.37	Intacto
		4.90	-15.10	0.55	-0.60	1 Capa
		4.90	-15.20	0.56	-0.61	2 Capas
		5.20	-15.9	0.56	-0.62	3 Capas

### 4.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PIE PUNTILLAS

Al igual que para el modelo del “Pie Apoyado”, y así facilitar la dirección de imposición de las cargas y la posterior interpretación de los datos, se ha mantenido la disposición de los 3 ejes del modelo anterior para no tener que redefinir nuevas direcciones.

Como se puede comprobar en la Figura 4.14, **en este caso el modelo sólo se encuentra apoyado en la parte metatarsal, junto a un grupo de nodos que se encuentran a lo largo de las falanges** y que son necesarios que se encuentren empotrados, es decir, con el desplazamiento impedido en cualquiera de las direcciones, para que así los cálculos tengan una solución coherente y no den lugar a valores erróneos en cuanto a los desplazamientos sufridos una vez aplicada la carga.

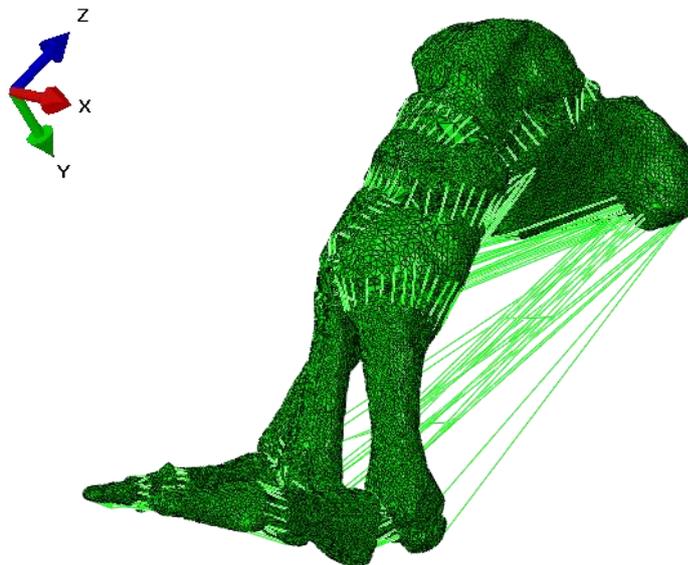


Fig. 4.14 Modelo de elementos finitos y representación de ejes “Pie Puntillas”

#### 4.3.1. RESULTADOS DE TENSIONES DE COMPRESIÓN Y TRACCIÓN

Debido a que **en cada caso de carga se han lanzado 4 simulaciones**, correspondientes al caso inicial del pie sin operar y a los 3 modelos donde se han ido retirando diferentes capas del total de material óseo, la batería de imágenes de dichos cálculos es demasiado elevada para mostrarlos todos, por lo que **para cada sollicitación del estudio, se han seleccionado los resultados de la profundidad de hueso retirado que resultaba más significativa.**

- **Caso de Carga 1:** se carga el hueso astrágalo con 1800 N.

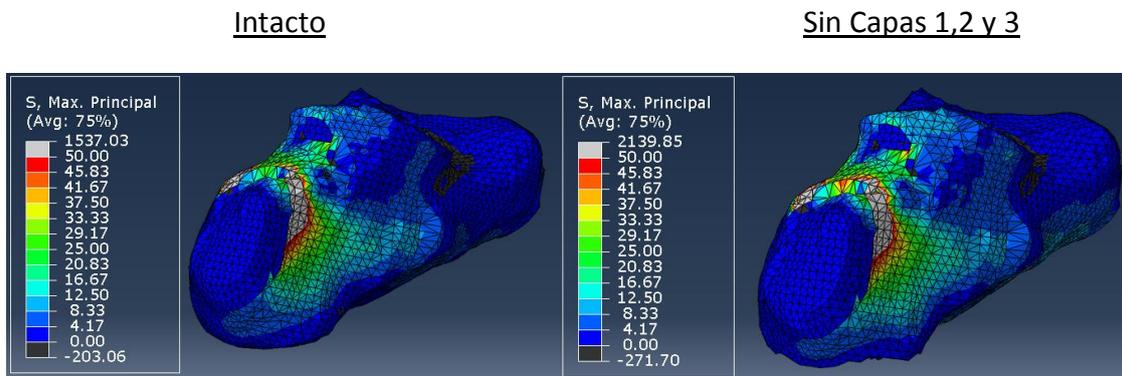


Fig. 4.15 Resultado de las tensiones de tracción para el Caso de Carga 1

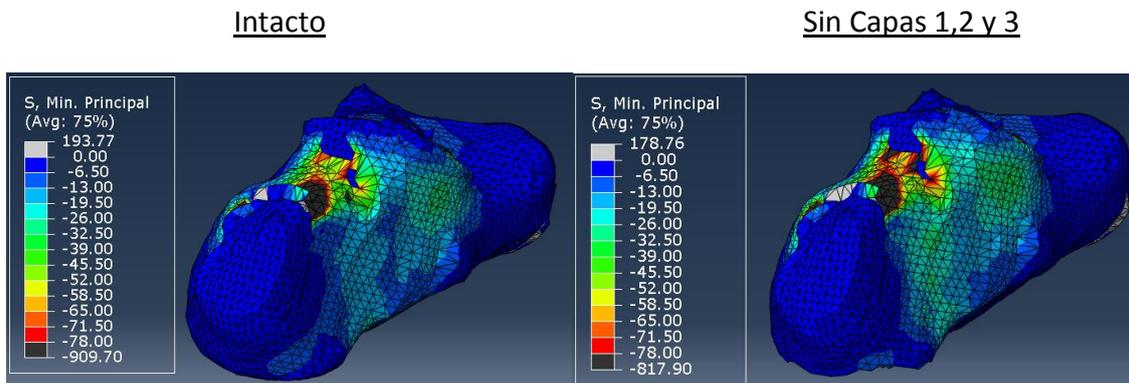


Fig. 4.16 Resultado de las tensiones de compresión para el Caso de Carga 1

- **Caso de Carga 2:** la carga aplicada en el astrágalo es de 3600 N.

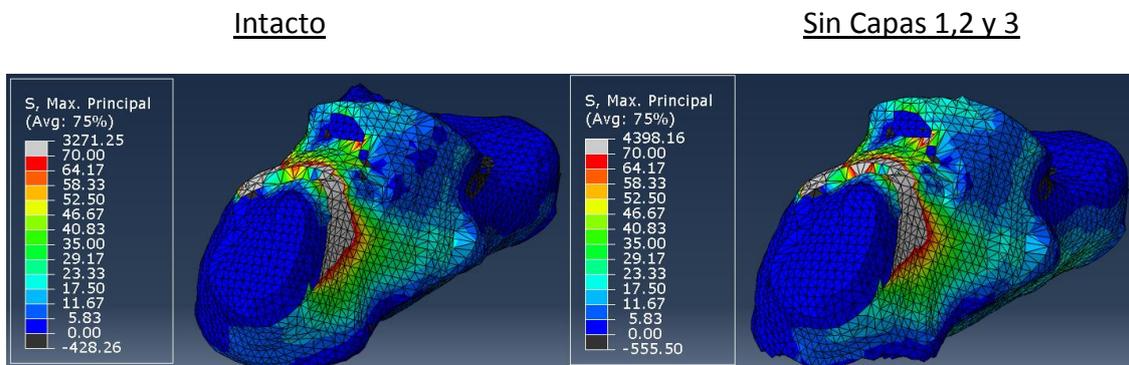


Fig. 4.17 Resultado de las tensiones de tracción para el Caso de Carga 2

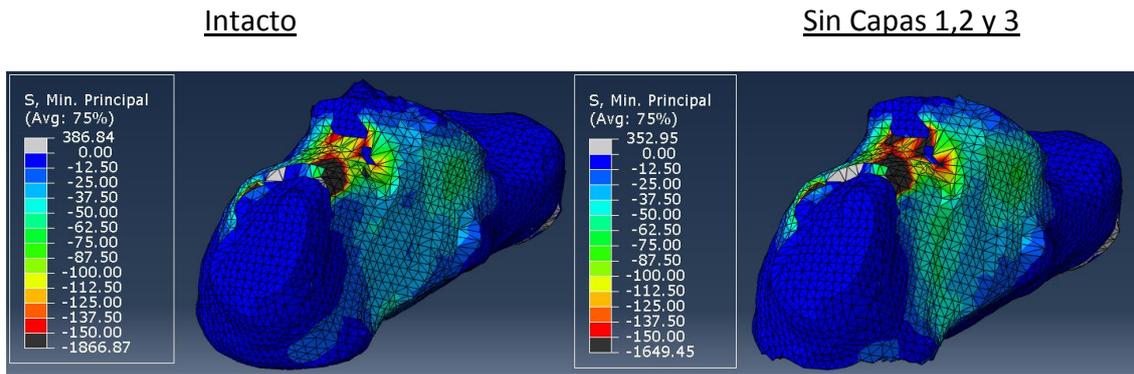


Fig. 4.18 Resultado de las tensiones de compresión para el Caso de Carga 2

- **Caso de Carga 3:** caso crítico donde se aplica una carga de 4500 N.

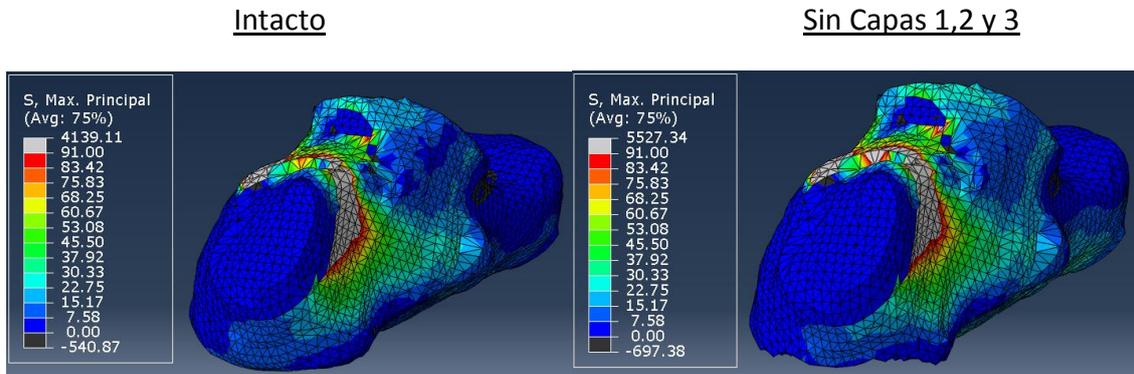


Fig. 4.19 Resultado de las tensiones de tracción para el Caso de Carga 3

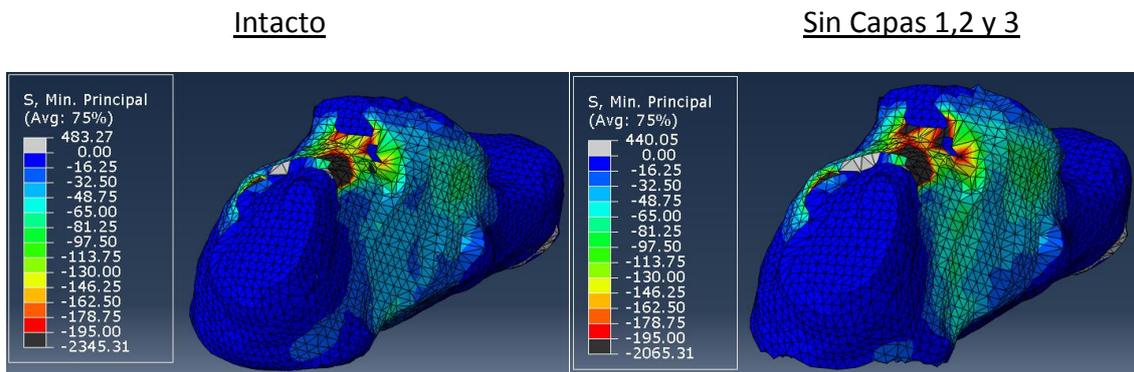


Fig. 4.20 Resultado de las tensiones de compresión para el Caso de Carga 3

### 4.3.2. RESULTADOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS

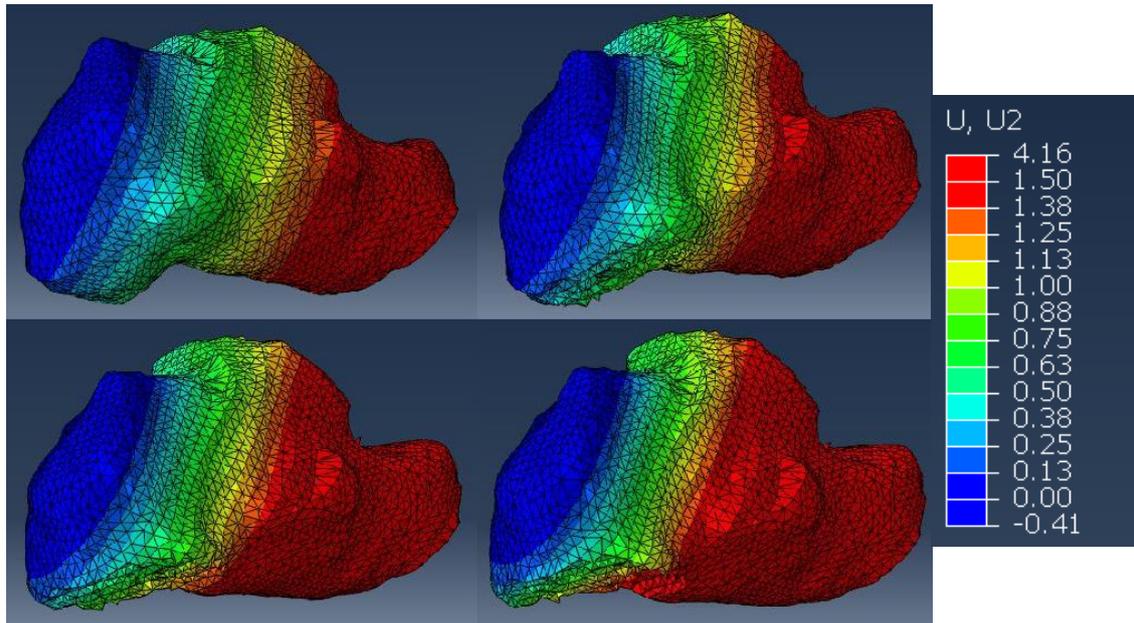


Fig. 4.21 Desplazamientos en el eje vertical Caso de Carga 1

### 4.3.3. RESUMEN Y COMPARATIVA DE RESULTADOS

Tabla 3 Cuadro resumen de los resultados modelo "Pie Puntillas"

Carga en Talón (Astrágalo)	Tensiones		Desplazamiento		Capa ósea retirada
	Tracción	Compresión	Eje y (+)	Eje y (-)	
1800 N	45.83	-71.5	2.40	-0.21	Intacto
	50.42	-76.08	2.77	-0.25	1 Capa
	54	-84.33	3.37	-0.32	2 Capas
	57.75	-88	4.16	-0.41	3 Capas
3600 N	68.5	-137.5	5.32	-0.48	Intacto
	73.33	-160.42	6.12	-0.57	1 Capa
	81.5	-174.17	7.31	-0.7	2 Capas
	86.8	-187.92	8.65	-0.85	3 Capas
4500 N	83.42	-178.75	6.78	-0.61	Intacto
	87.08	-197.08	7.8	-0.82	1 Capa
	91.67	-206.25	9.28	-0.89	2 Capas
	100.83	-215.42	10.90	-1.07	3 Capas

## **5. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO Y DISCUSIÓN**

En primer lugar, y partiendo de la base de que el estudio se realiza sólo con una muestra de espolón, no se obtienen unos resultados completamente veraces desde el punto de vista cuantitativo, sino que para realizar un estudio concluyente cuantitativamente, se deberían de tomar varias muestras de espolones extraídos en diversas intervenciones quirúrgicas, para así conocer con mayor exactitud qué medidas, en cuanto a profundidades del material óseo retirado se refieren, serían las óptimas, pudiendo incluso hacer un estudio estadístico.

Tal y como se ha ejecutado el proceso de la obtención de resultados, y una vez lanzados todos los cálculos pertenecientes a las diferentes sollicitaciones estudiadas y realizando las comparativas en función de los diferentes valores de profundidad del espolón, se establecen las siguientes premisas que, a priori, serían concluyentes para el caso en el que se basa este estudio:

- Se comprueba en ambos modelos, que para el caso de carga crítico, el cuál trataría de ejemplificar una situación anormal de pisada o una carga un tanto inusual, se obtienen valores de tensiones de tracción y compresión muy elevados y alejados del caso que se toma como original, es decir, el hueso sin intervenir.
- Además, para el caso del modelo “Pie Apoyado”, conforme se aumenta la profundidad de material óseo retirado, las tensiones que sufre la parte del talón que apoya en el suelo crecen de tal manera, que hacen que aparezcan unos sobreesfuerzos que podrían causar un problema en el hueso a largo plazo.
- Comentar que los resultados de este modelo, para la profundidad que resulta de retirar sólo la Capa 1 y de retirar las Capas 1 y 2, tienen un alto grado de semejanza, tanto para los casos de carga 1 y 2, donde se varía la carga del hueso astrágalo pero se mantiene la proporcionalidad de dicho aumento, como para el caso de carga 3, donde la influencia de variar la carga sobre el tendón de Aquiles no tiene apenas repercusión en las tensiones que se generan.
- En cuanto al modelo del “Pie Puntillas”, y al no encontrarse apoyado en la zona del talón, hay que restarle importancia a las tensiones que sufre el hueso calcáneo en su parte inferior donde se daría el apoyo con el suelo. Si bien, cobran mayor importancia las tensiones generadas en la zona de unión del hueso calcáneo con astrágalo, que se encuentra inmediatamente encima, y donde se aprecia el aumento de dichos esfuerzos.

- También se aprecia un aumento de los desplazamientos de unión de los dos huesos, que aumenta de manera excesiva conforme la cantidad de material óseo retirado es mayor.
- Atendiendo a la distribución de los valores de los desplazamientos, se comprueba que para la zona donde se realiza la intervención, los resultados varían en proporción al aumento de la carga, y que para el Caso de carga 3 si que se producirían los valores críticos, por lo que resultaría adecuado retirar la profundidad resultante de las capas 1 y 2.

De esta manera, quedan demostradas las suposiciones previas al estudio que preveían como caso más crítico la solicitud de los casos de carga 3 para los dos modelos, y además, que las tensiones que se generan en parte del hueso calcáneo donde se retira el material, variarían y se harían mayores en función del material óseo retirado, ya que al disminuir la zona que soporta el esfuerzo, dichas tensiones provocan los sobreesfuerzos que se han obtenido en las simulaciones.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Biomecánica” [En línea] <http://es.wikipedia.org/wiki/Biomecanica>
- [2] Espolón calcáneo. Diciembre 2015. <http://salud.ccm.net/faq/5757-espolon-calcaneo-causas-y-tratamientos>
- [3] <http://www.foroatletismo.com/lesiones/fascitis-plantar-espolon-calcaneo/>
- [4] <http://netdoctor.elespanol.com/articulo/dolor-talon-y-espolon-calcaneo>
- [5] <http://mejorconsalud.com/espolon-calcaneo-sintomas-y-tratamiento/>
- [6] <http://www.dmedicina.com/enfermedades/enfermedades-del-pie/espolon.html>
- [7] <http://www.blogdetrauma.com/espolon-calcaneo/> Doctor en Traumatología y Cirugía Ortopédica: Enrique Galindo Martens
- [8] [http://perso.mines-albi.fr/~penazzi/ideas/Ideas\\_10\\_NX\\_Series.pdf](http://perso.mines-albi.fr/~penazzi/ideas/Ideas_10_NX_Series.pdf)
- [9] <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-biomechanics> -- J. Bayod, R.Becerro-de-Bengoa-Vallejo, M.E.Losa-Iglesias, M.Doblare´ “Mechanical stress redistribution in the calcaneus after autologous bone harvesting” 2012
- [10] John C. Gardiner, Jeffrey A. Weiss. Elastic and Viscoelastic Shear Properties of the Medial Collateral Ligament. Marzo 2000.
- [11] <http://biomecanicayortopediadelpie.blogspot.com.es>
- [12] Simulia, Abaqus/CAE User’s Manual

# **ANEXOS**

---

## ANEXO A – Análisis gráfico y numérico de las simulaciones del modelo “Pie Apoyado”

A continuación, y debido al alto volumen de imágenes ilustrativas que resultan de todas las simulaciones lanzadas, se ha realizado el Anexo A, donde se va a mostrar los resultados del modelo del “Pie Apoyado”, y el Anexo B, donde se hace referencia al modelo “Pie Puntillas”.

Además para facilitar la distribución de las imágenes, se ha subdividido cada anexo en una primera parte donde se encuentran los resultados de las tensiones, y por otro lado, los desplazamientos obtenidos en las simulaciones.

### **A.1. RESULTADO Y COMPARATIVA DE LAS TENSIONES DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN**

Tal y como se ha presentado el Apartado 4 de la memoria y en base a los pasos seguidos para realizar las simulaciones, los resultados están clasificados en función de los diferentes casos de carga o sollicitaciones aplicadas.

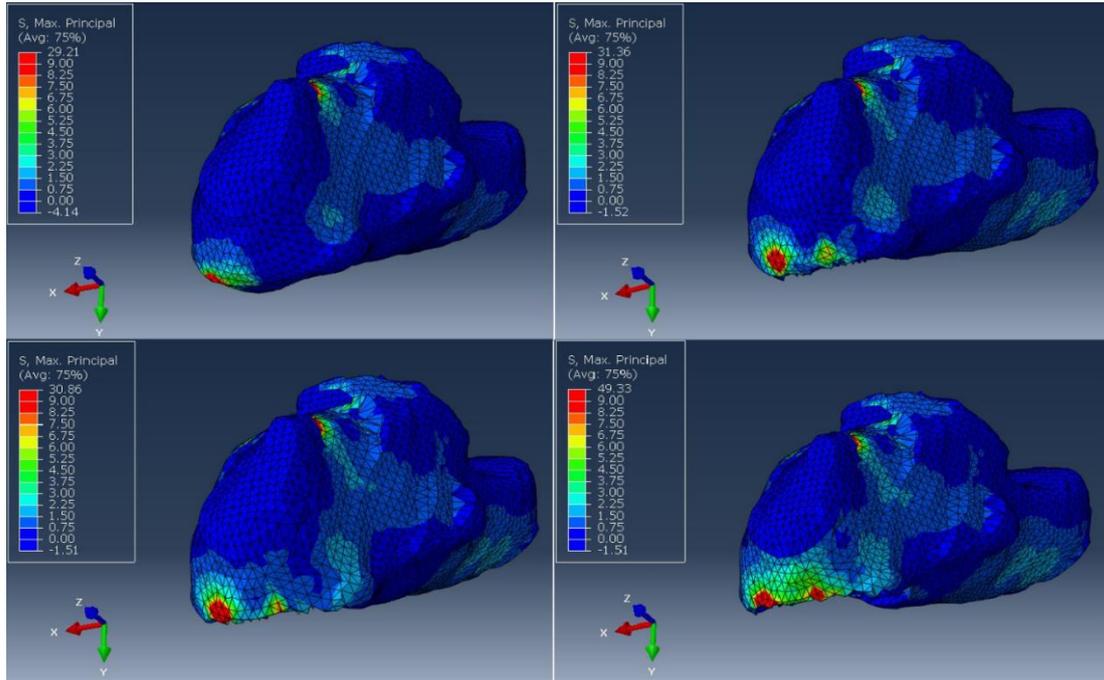
Es una manera de comprender con mayor facilidad las variaciones en los resultados obtenidos en las simulaciones en función de la profundidad de material óseo que se retira en la intervención.

#### **A.1.1. COMPARATIVA RESULTADOS CASO 1 DE CARGA**

Se carga el modelo con **300 N en el hueso astrágalo**, y la carga que representa la **tensión ejercida en el tendón de Aquiles es de 150 N**.

Intacto

Sin Capa 1



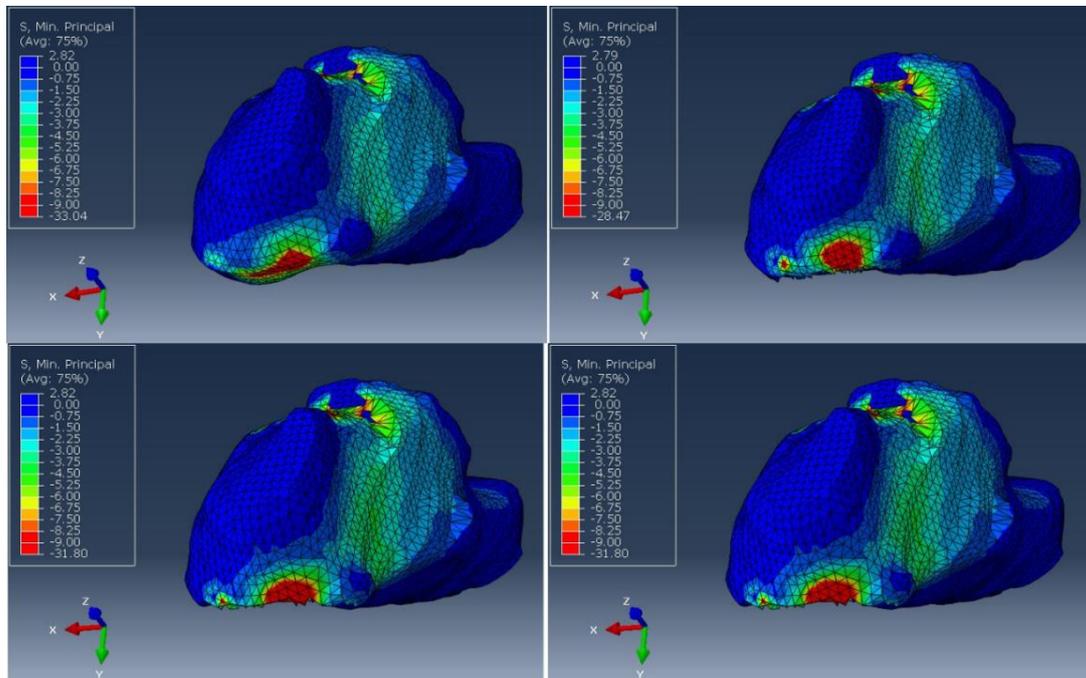
Sin capas 1 y 2

Sin Capas 1, 2 y 3

**Fig. A.1.1.1 Tensiones de tracción eje vertical Caso 1**

Intacto

Sin Capa 1



Sin capas 1 y 2

Sin Capas 1, 2 y 3

**Fig. A.1.1.2 Tensiones de compresión eje Antero-Posterior Caso 1**

### A.1.2. COMPARATIVA RESULTADOS CASO 2 DE CARGA

Para este caso, se aplica una carga constante en el tendón de Aquiles de 150 N:

- **CASO 2.1:** se carga el modelo con 600 N en el hueso astrágalo

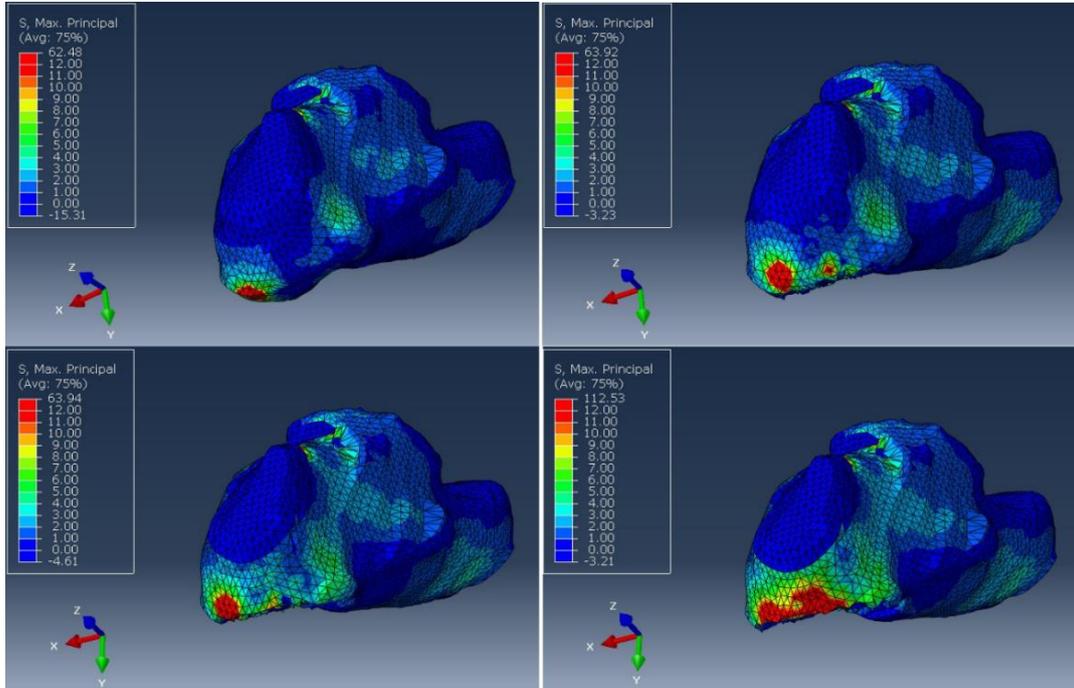


Fig. A.1.2.1 Tensiones de tracción eje vertical Caso 2.1

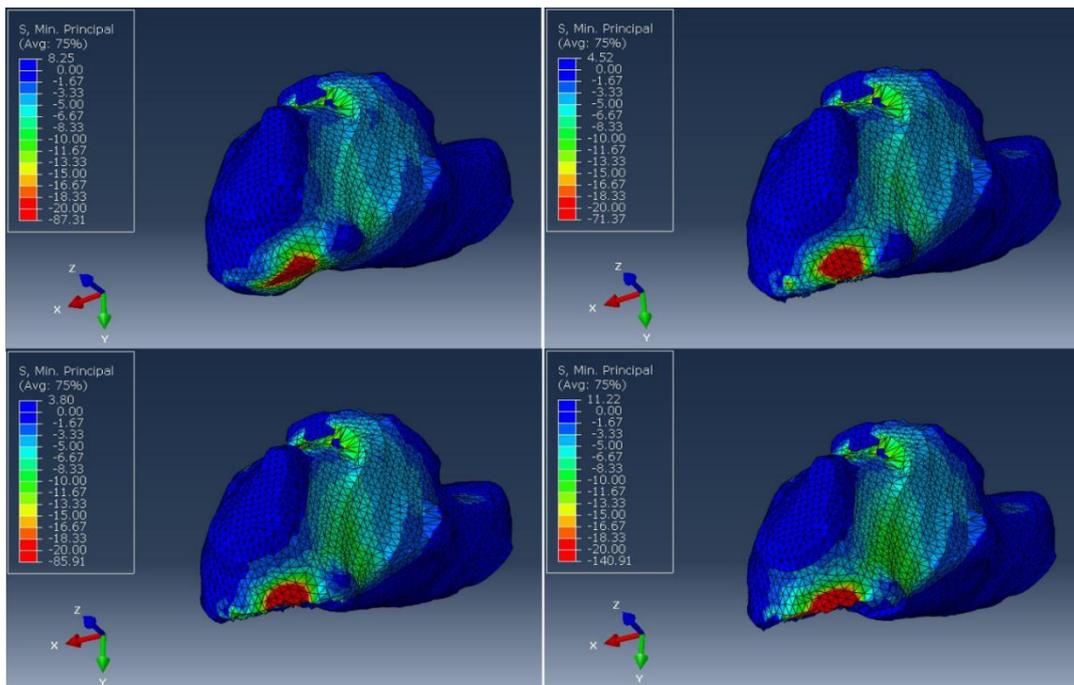


Fig. A.1.2.2 Tensiones de compresión eje Antero-Posterior Caso 2.1

- **CASO 2.2:** en este caso la carga sobre el astrágalo es de 750 N.

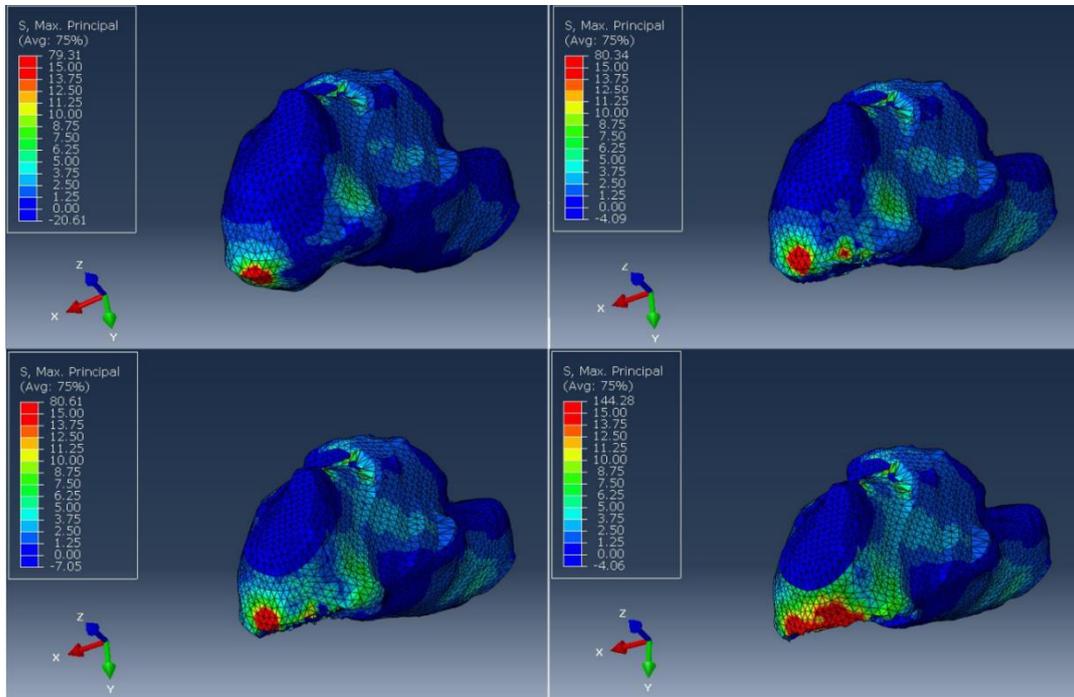


Fig. A.1.2.3 Tensiones de tracción eje vertical Caso 2.2

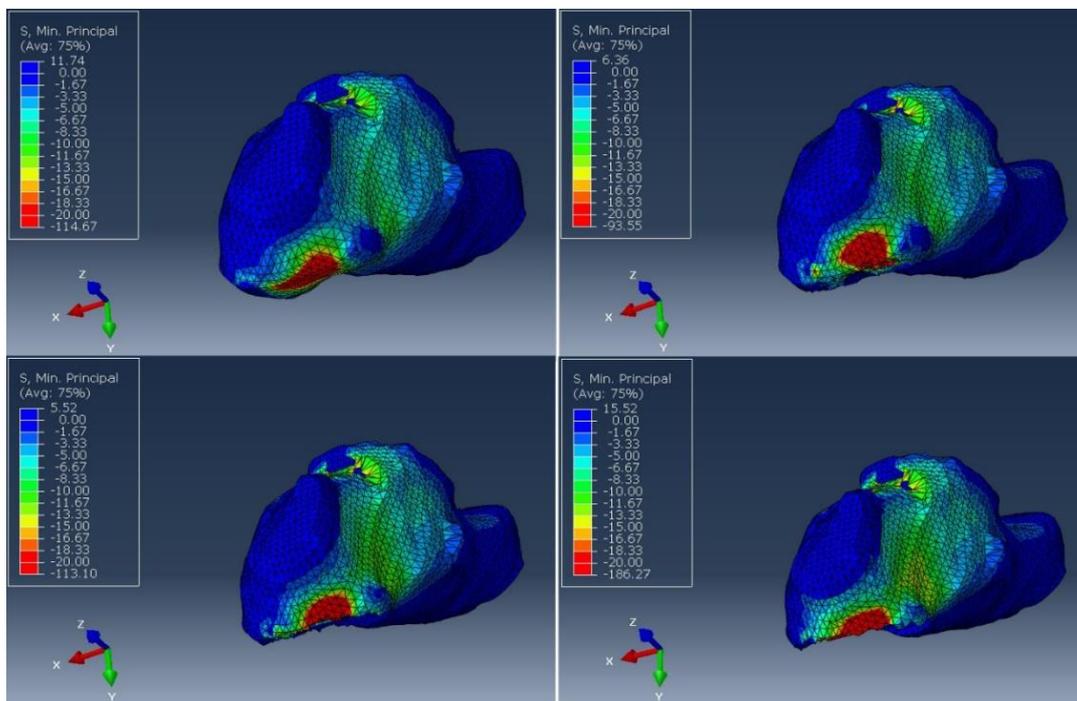


Fig. A.1.2.4 Tensiones de compresión eje Antero-Posterior Caso 2.2

### A.1.3. COMPARATIVA RESULTADOS CASO 3 DE CARGA

La carga aplicada sobre el astrágalo para esta sollicitación es de unos 300 N.

- **CASO 3.1:** la aplica una carga en el tendón de Aquiles es de 300 N.

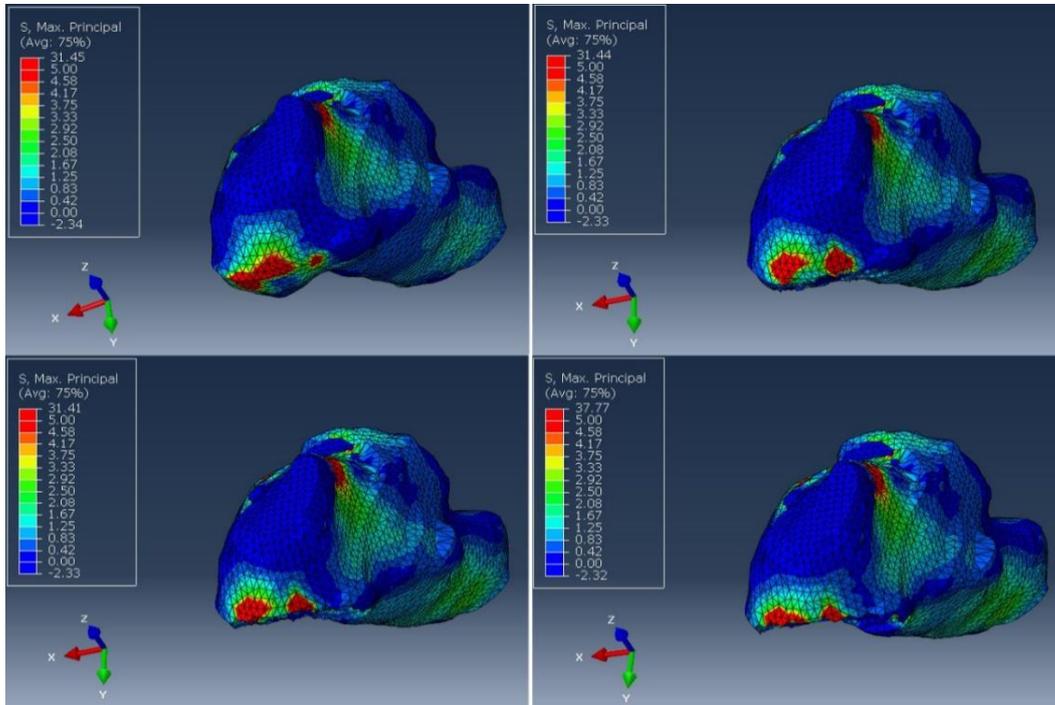


Fig. A.1.3.1 Tensiones de tracción eje vertical Caso 3.1

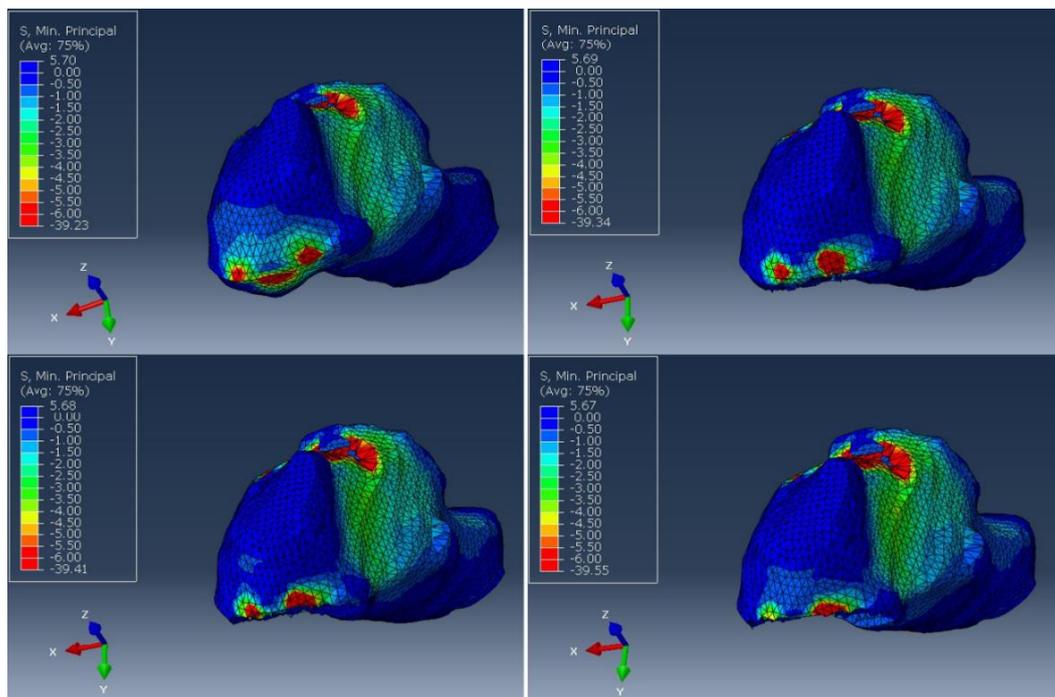


Fig. A.1.3.2 Tensiones de compresión eje Antero-Posterior Caso 3.1

- **CASO 3.2:** se aumenta la carga sobre el tendón de Aquiles a 375 N.

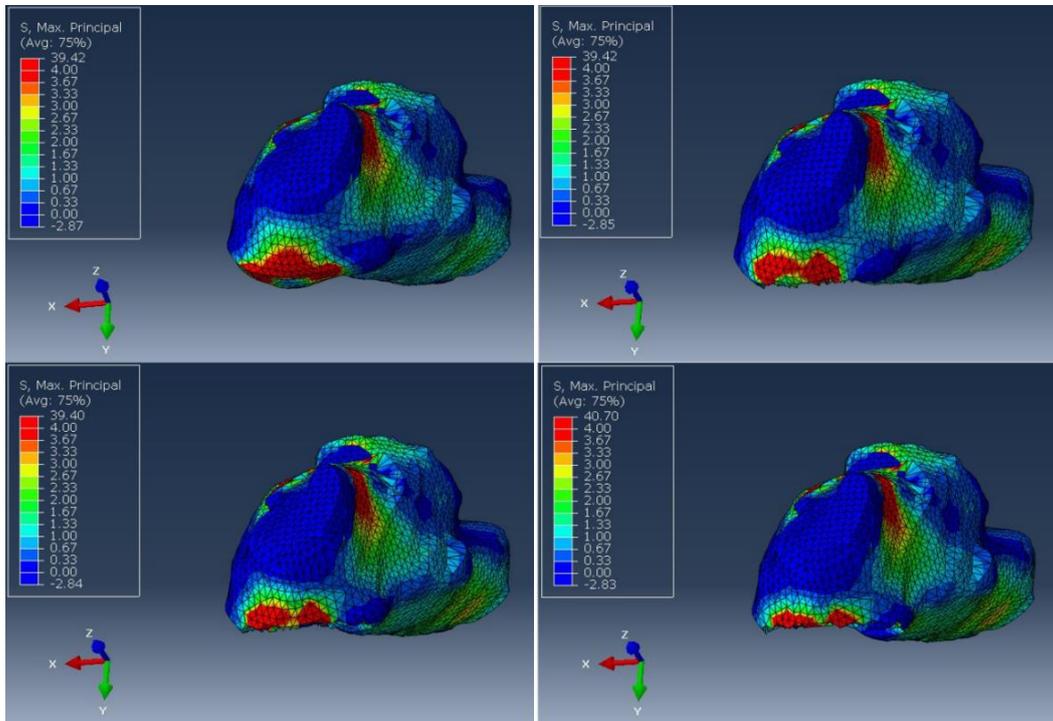


Fig. A.1.3.3 Tensiones de tracción eje vertical Caso 3.2

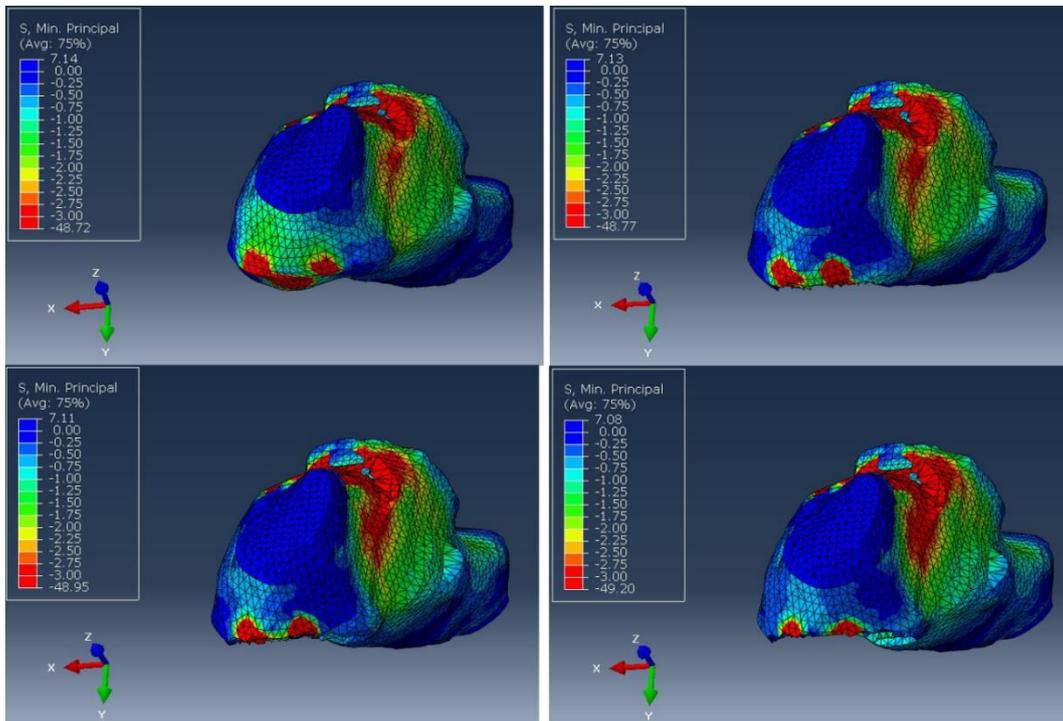


Fig. A.1.3.4 Tensiones de compresión eje Antero-Posterior Caso 3.2

## A.2. RESULTADO Y COMPARATIVA DE LOS DESPLAZAMIENTOS

Del mismo modo que en el apartado de la comparativa de las tensiones que resultan en el pie al aplicar las diferentes solicitaciones, he seguido el mismo procedimiento para presentar los desplazamientos, haciendo distinción de los casos en función de dichas solicitaciones.

### A.2.1. COMPARATIVA CASO 1 DE CARGA

Se carga el modelo con **300 N en el hueso astrágalo**, y la carga que representa la **tensión ejercida en el tendón de Aquiles es de 150 N**.

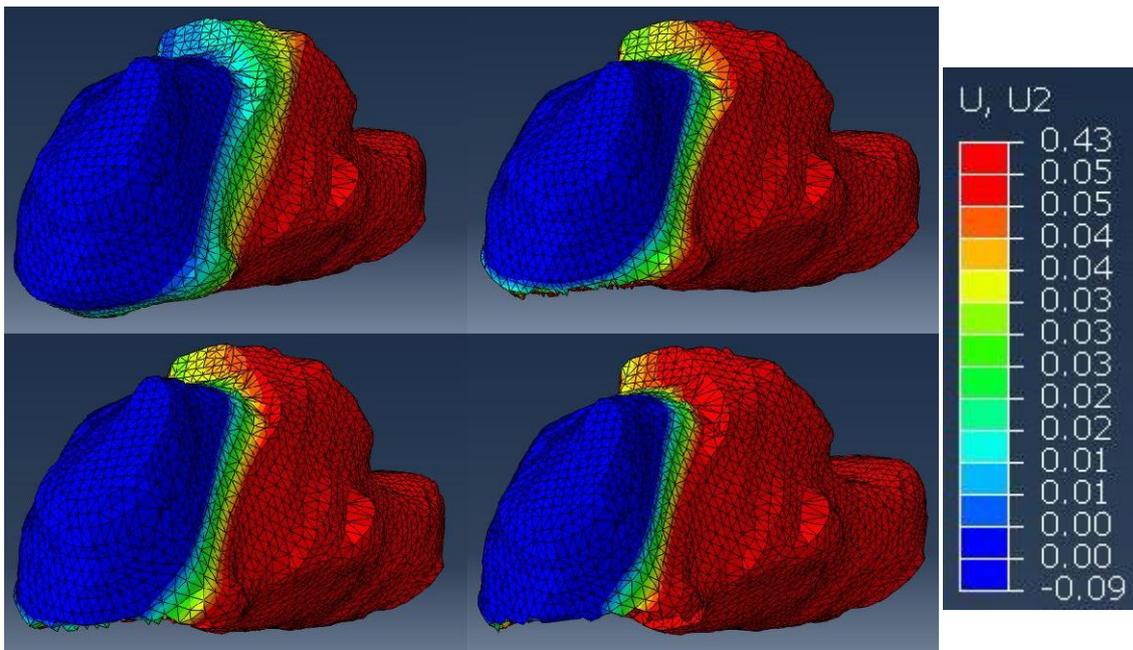


Fig. A.2.1.1 Desplazamientos eje vertical Caso 1

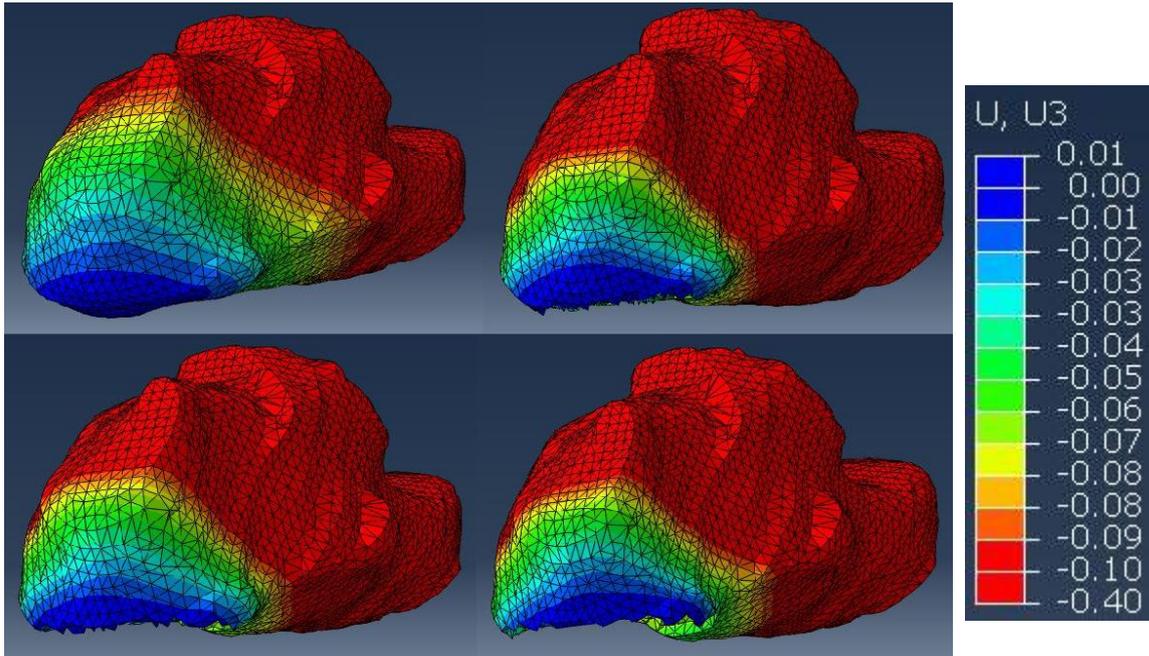


Fig. A.2.1.2 Desplazamientos eje Antero-Posterior Caso 1

## A.2.2. COMPARATIVA CASO 2 DE CARGA

- **CASO 2.1:** tensión ejercida en el tendón de Aquiles de 150 N constante y se carga el modelo con 600 N sobre el hueso astrágalo.

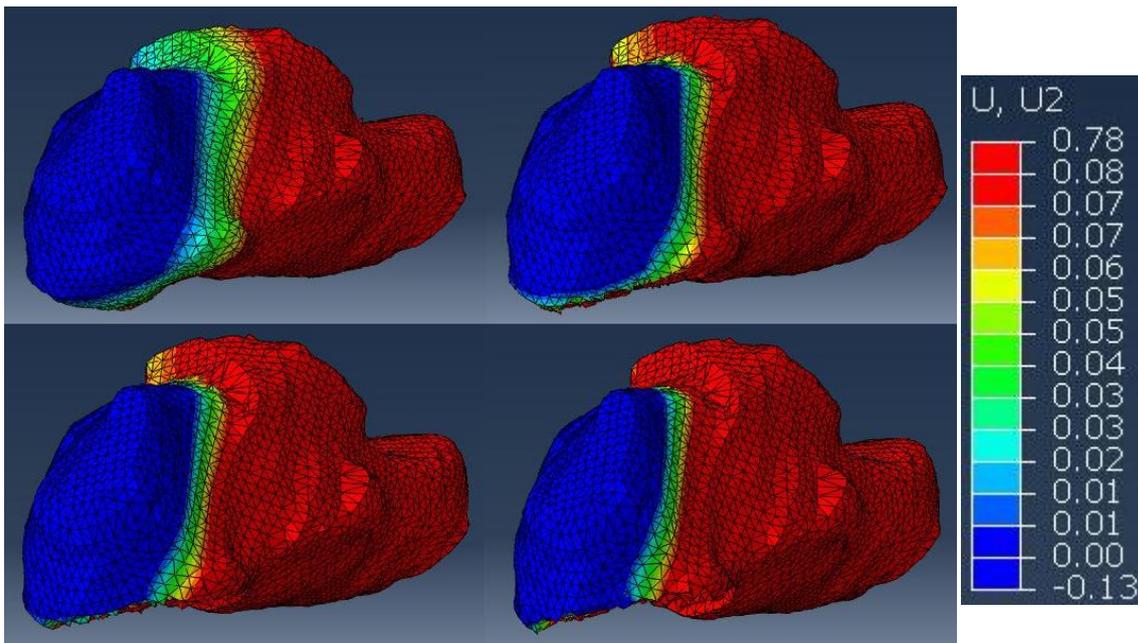


Fig. A.2.2.1 Desplazamientos eje vertical Caso 2.1

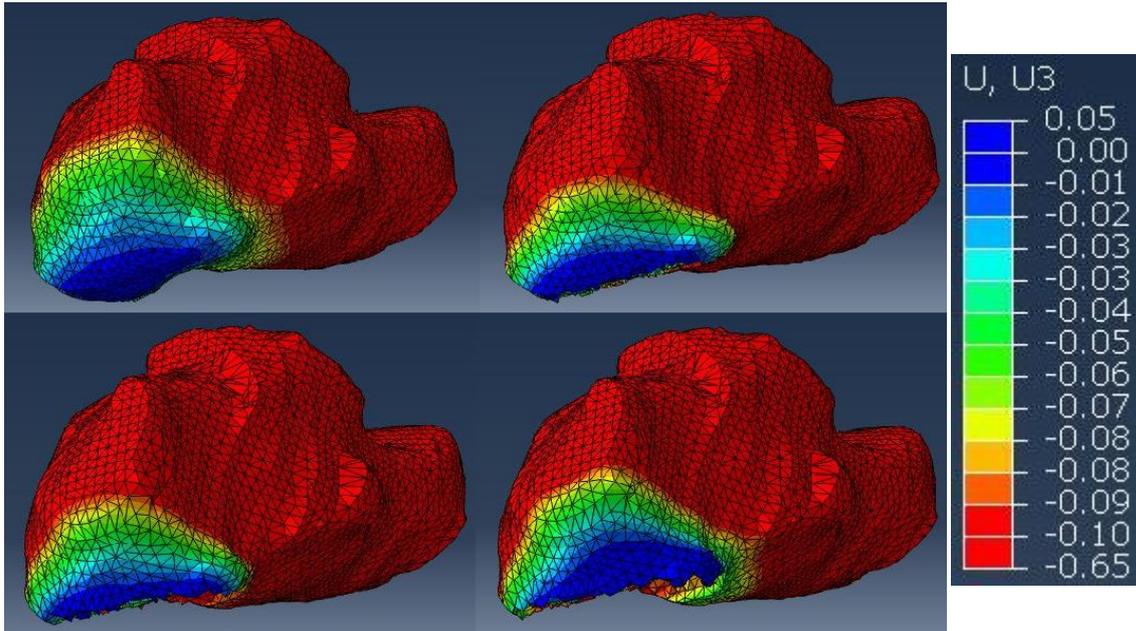


Fig. A.2.2.2 Desplazamientos eje Antero-Posterior Caso 2.1

- **CASO 2.2:** en este caso la carga de **solicitación del peso es de 750 N** manteniendo la **carga sobre el tendón de Aquiles de 150 N**.

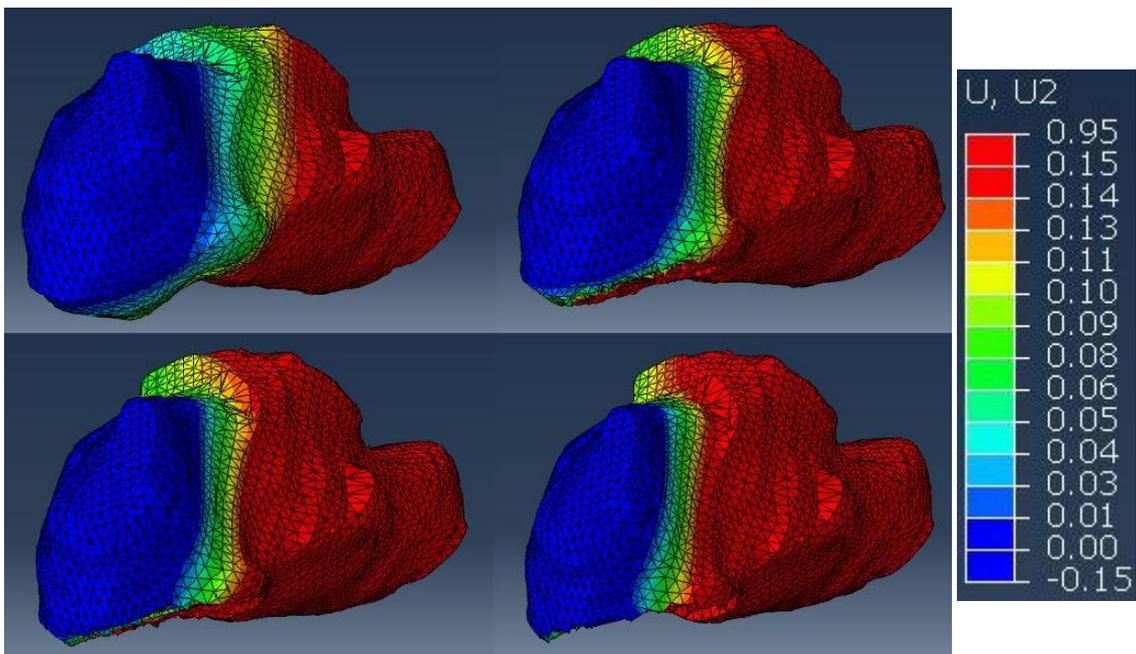


Fig. A.2.2.3 Desplazamientos eje vertical Caso 2.2

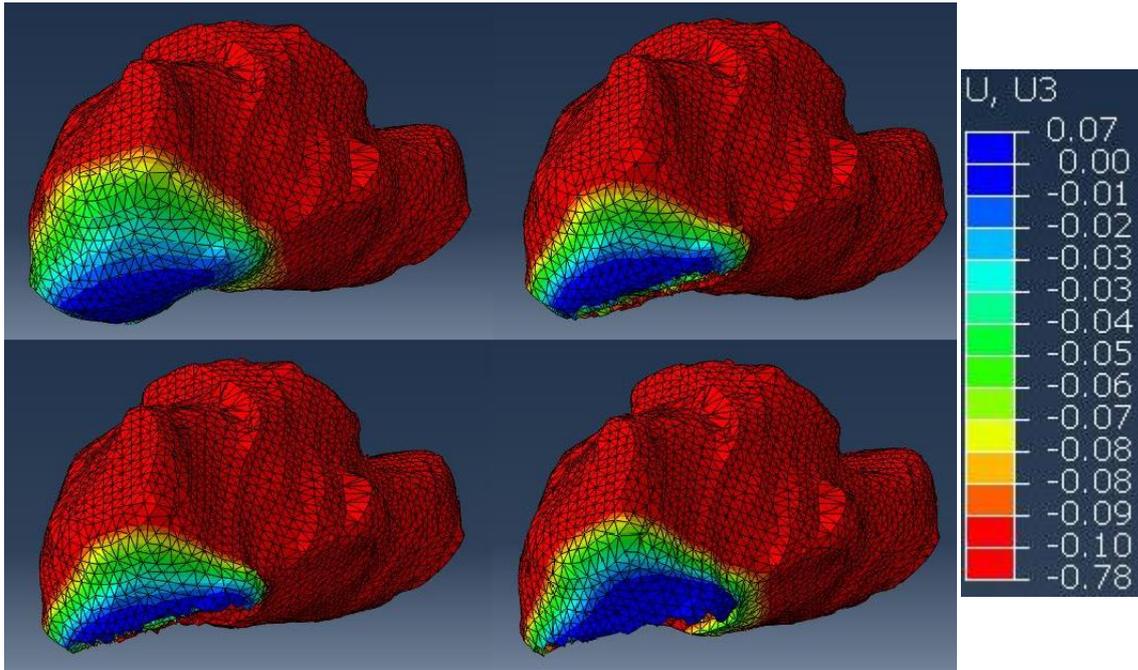


Fig. A.2.2.4 Desplazamientos eje Antero-Posterior Caso 2.2

### A.2.3. COMPARATIVA CASO 3 DE CARGA

- **CASO 3.1:** la carga sobre el astrágalo es de 300 N y la carga aplicada en el tendón de Aquiles es de 300 N.

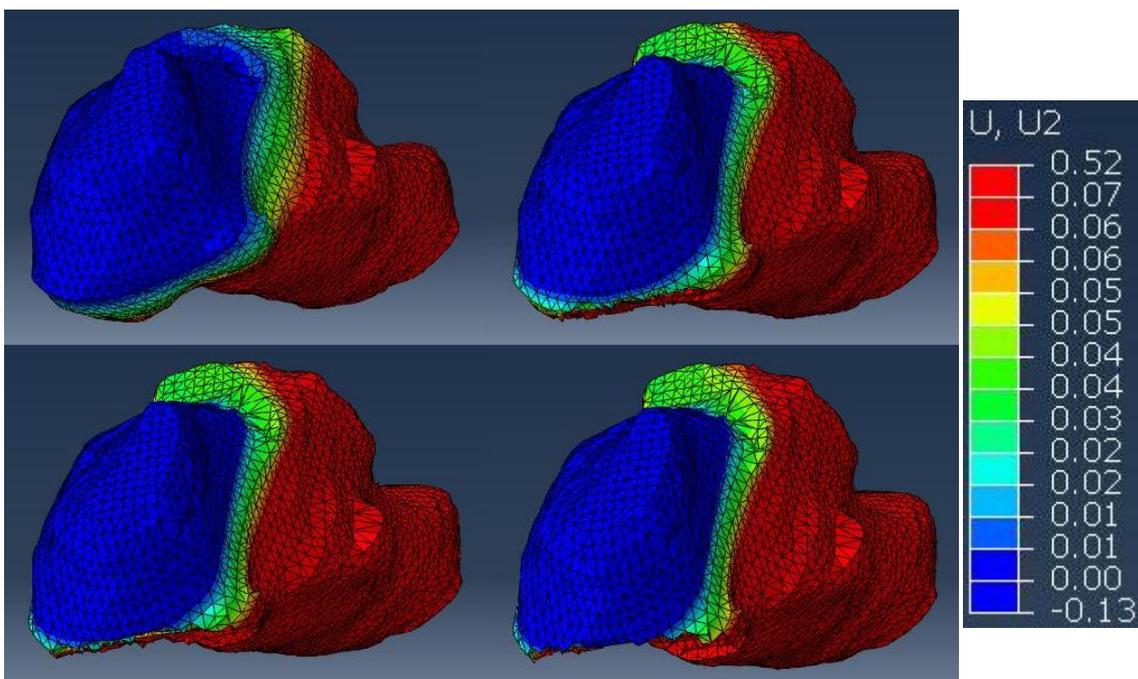


Fig. A.2.3.1 Desplazamientos eje vertical Caso 3.1

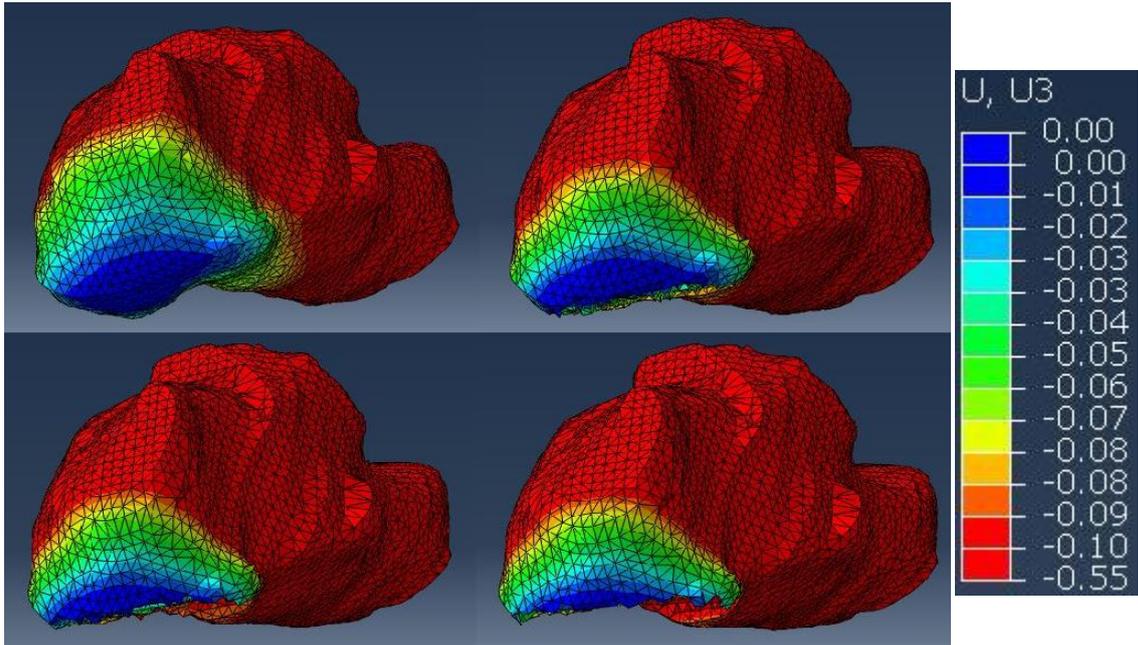


Fig. A.2.3.2 Desplazamientos eje Antero-Posterior Caso 3.1

- **CASO 3.2:** en este caso se mantiene la carga de 300 N sobre el astrágalo y se aumenta la carga sobre el tendón de Aquiles a 375 N.

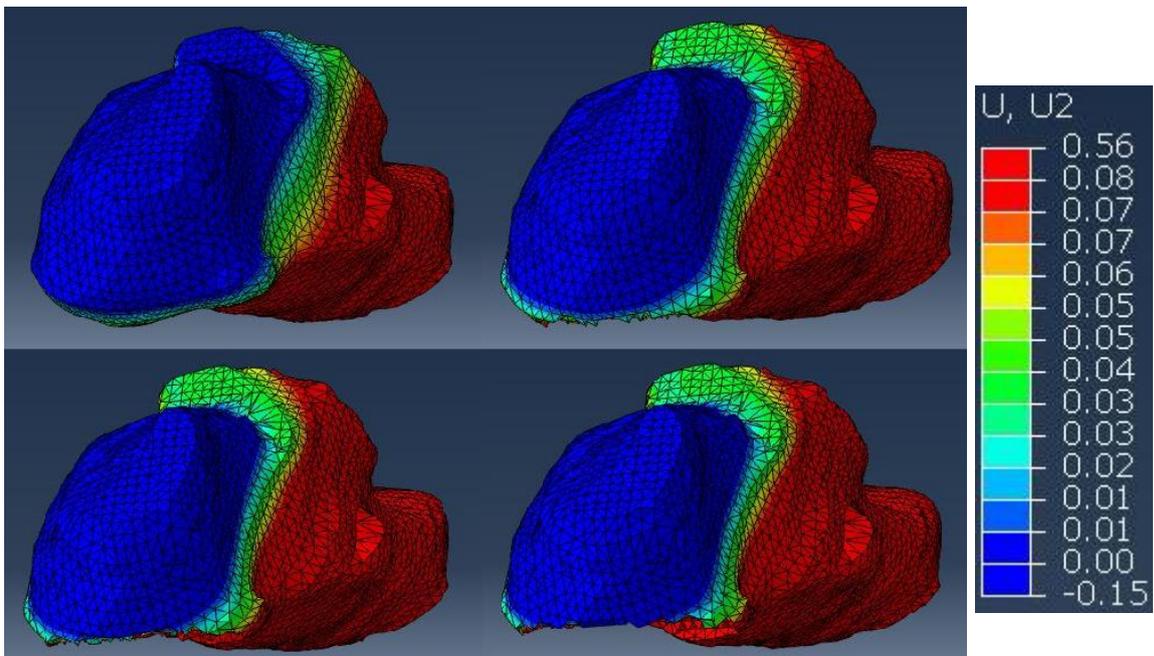


Fig. A.2.3.3 Desplazamientos eje vertical Caso 3.2

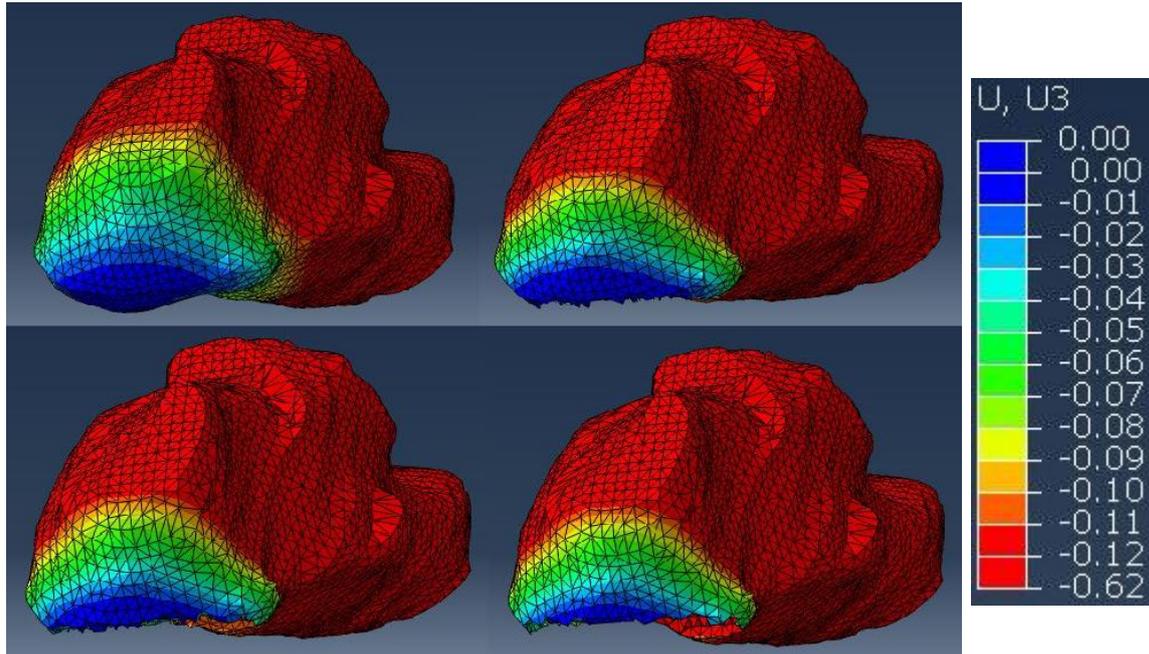


Fig. A.2.3.4 Desplazamientos eje Antero-Posterior Caso 3.2

## ANEXO B – Análisis gráfico y numérico de las simulaciones del modelo “Pie Puntillas”

Para el modelo “Pie Puntillas” también se han clasificado todos los resultados de las simulaciones en la parte relacionada con las tensiones, y por otro lado, en los resultados de desplazamientos.

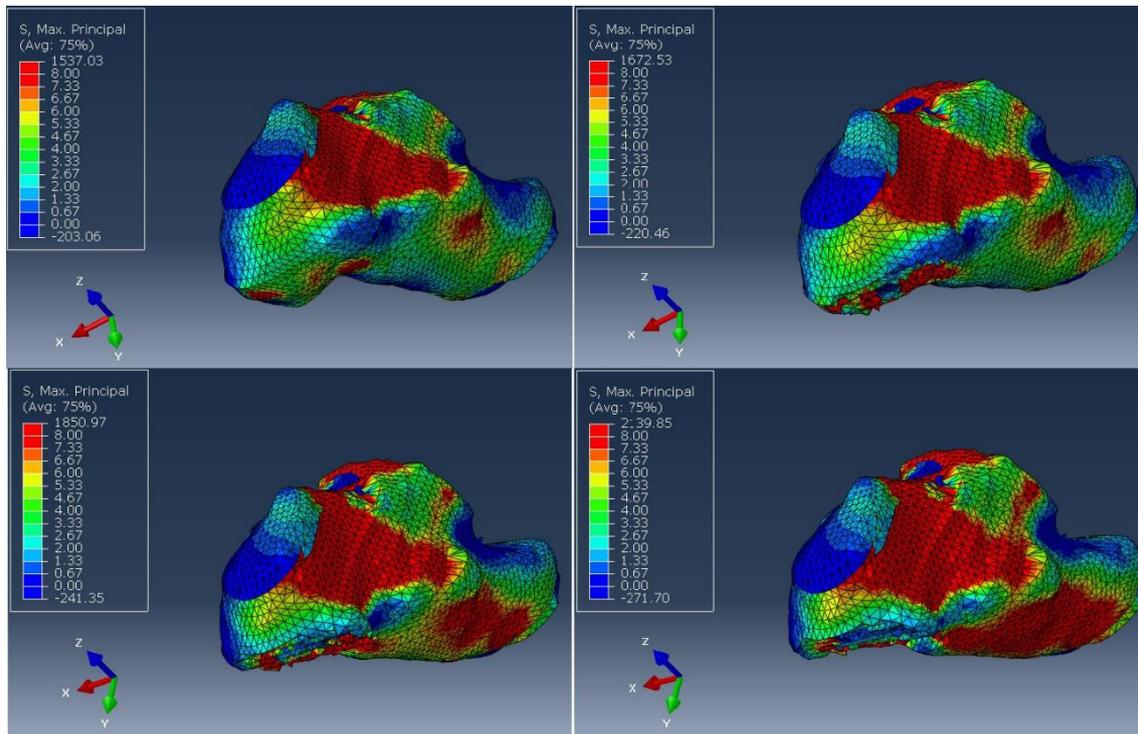
A su vez, todo ello clasificándolo en función de los casos de carga que se han tomado en el estudio.

### **B.1. RESULTADO Y COMPARATIVA DE LAS TENSIONES DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN**

En el modelo de “Pie Puntillas” no se aplica la carga en el tendón de Aquiles, por los que los casos de carga se diferencian por la carga aplicada sobre el hueso astrágalo.

#### **B.1.1. COMPARATIVA CASO 1 DE CARGA**

- **CASO 1:** se carga el modelo con 1800 N en el hueso astrágalo.



**Fig. B.1.1.1 Tensiones de tracción eje vertical Caso 1**

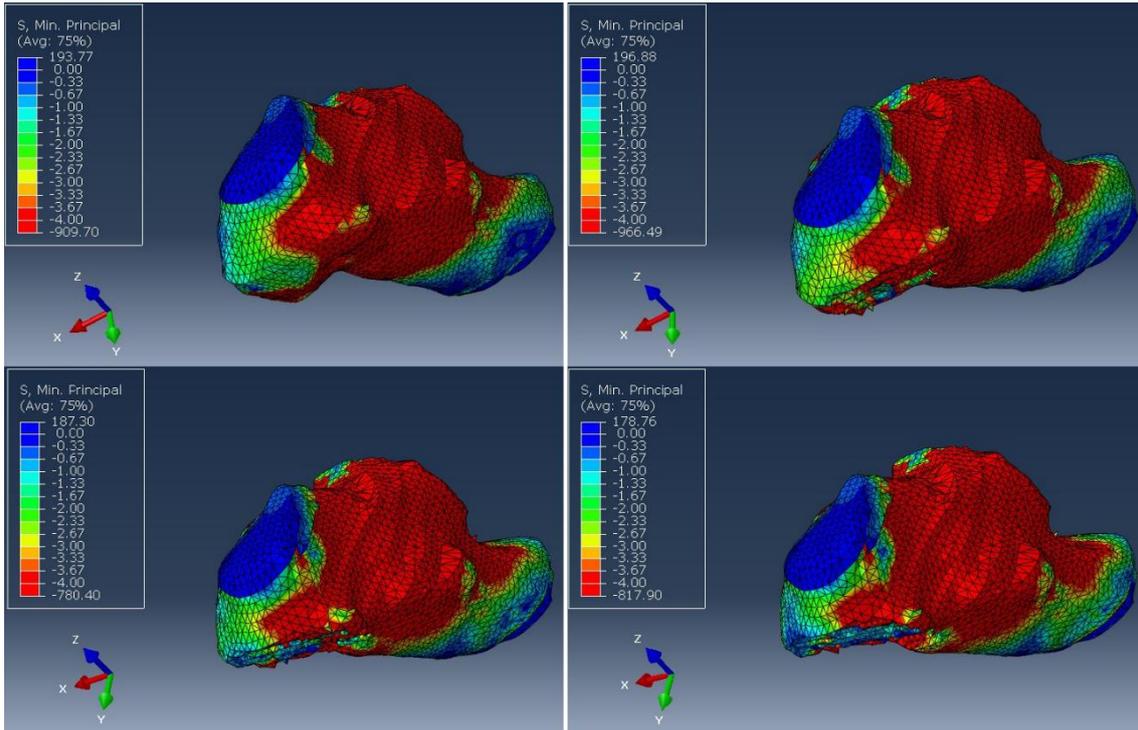


Fig. B.1.1.2 Tensiones de compresión eje Antero-Posterior Caso 1

### B.1.2. COMPARATIVA CASO 2 DE CARGA

- **CASO 2:** se aumenta la carga del hueso astrágalo a 3600 N.

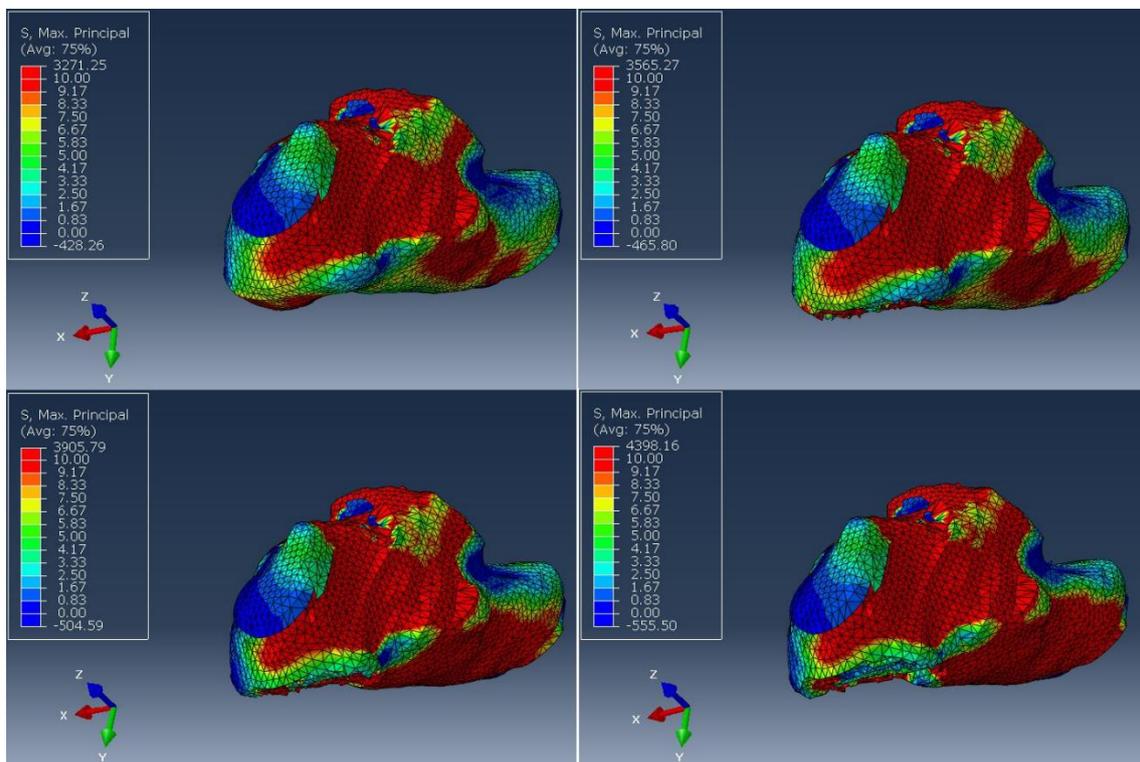
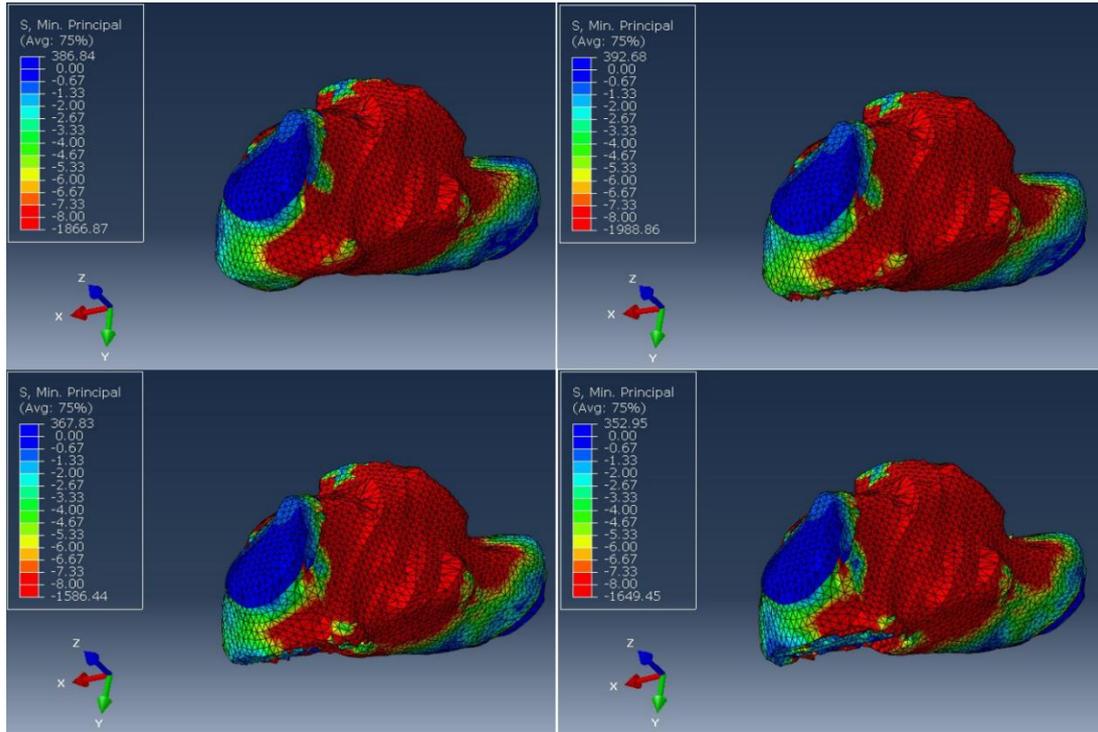


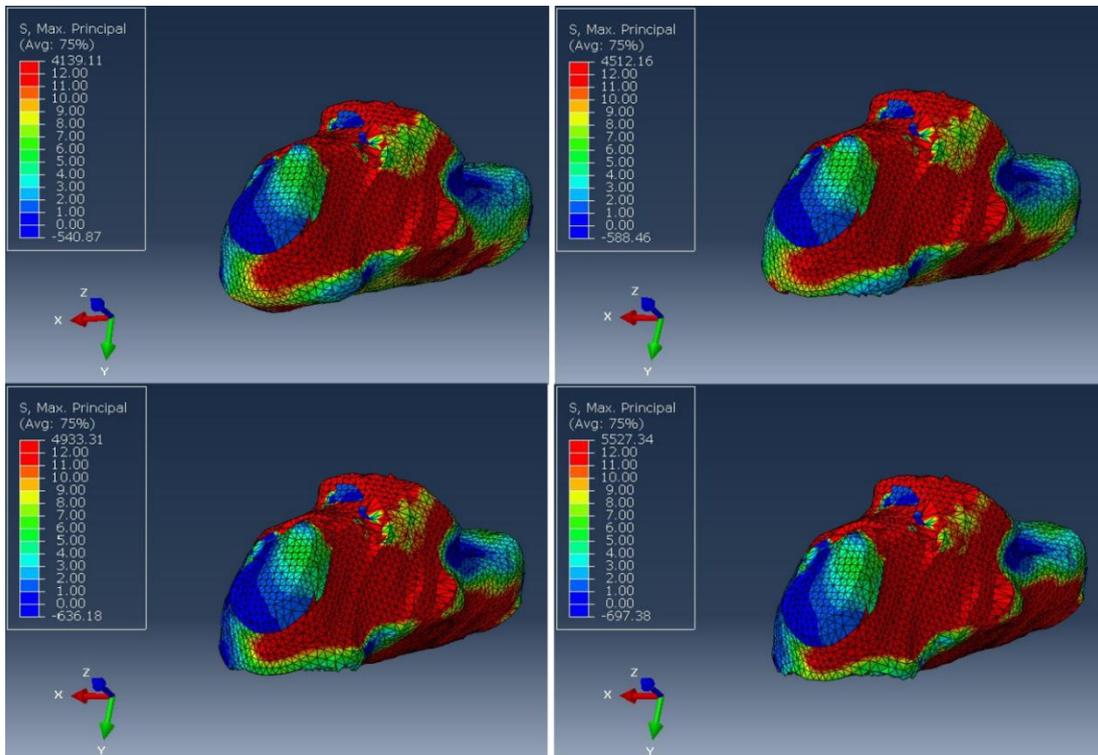
Fig. B.1.2.1 Tensiones de tracción eje vertical Caso 2



**Fig. B.1.2.2 Tensiones de compresión eje Antero-Posterior Caso 2**

**B.1.3. COMPARATIVA CASO 3 DE CARGA**

- **CASO 3: caso crítico con una carga en astrágalo de 4500 N.**



**Fig. B.1.3.1 Tensiones de tracción eje vertical Caso 3**

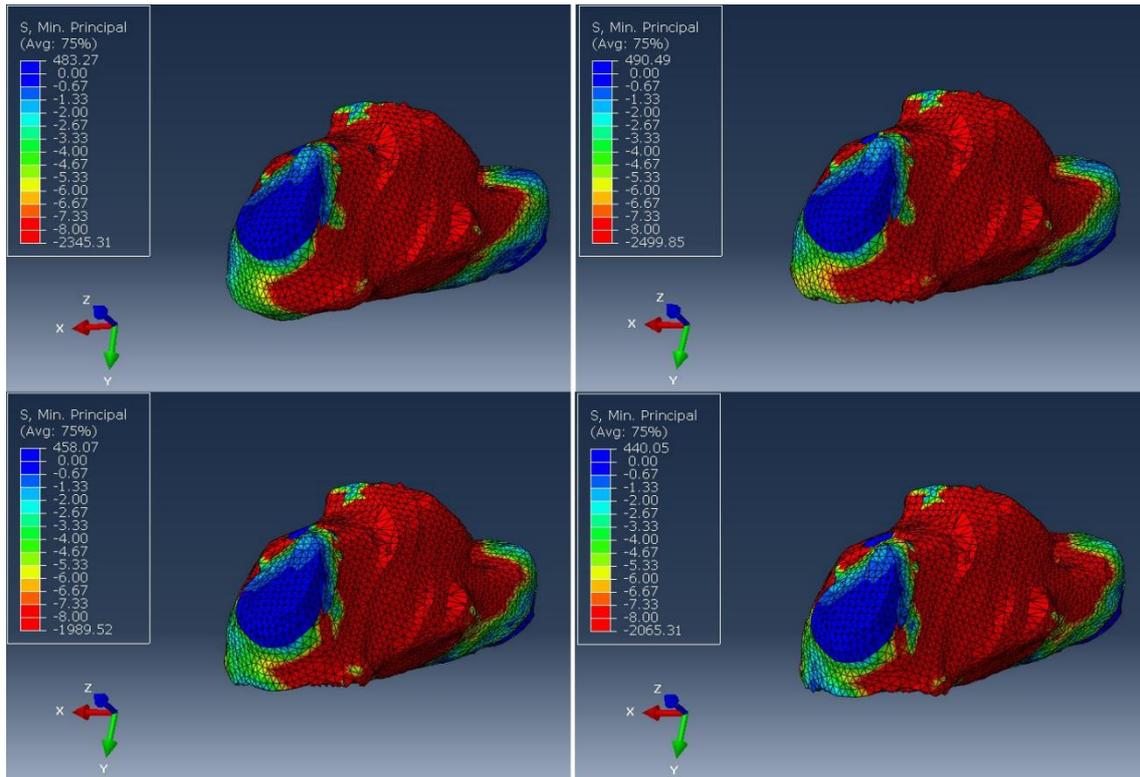


Fig. B.1.3.2 Tensiones de compresión eje Antero-Posterior Caso 3

## B.2. RESULTADO Y COMPARATIVA DE LOS DESPLAZAMIENTOS

Del mismo modo que en el anexo A, se ha seguido el mismo procedimiento para presentar los desplazamientos, haciendo distinción de los casos en función de dichas sollicitaciones.

### B.2.1. COMPARATIVA CASO 1 DE CARGA

Se carga el modelo con **1800 N** sobre el hueso astrágalo

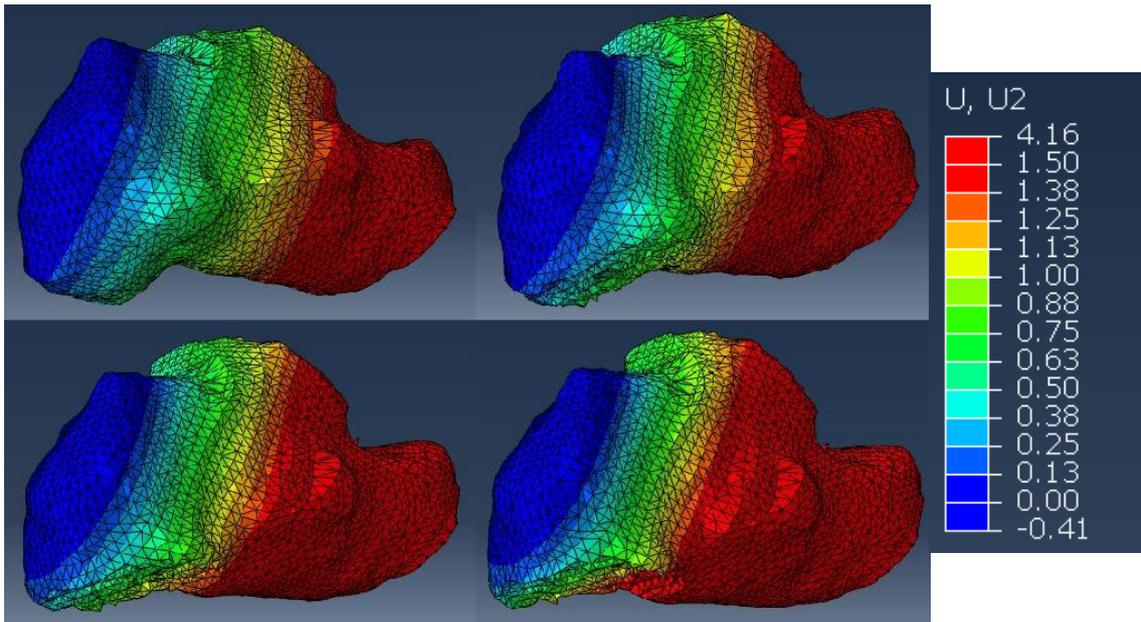


Fig. B.2.1.1 Desplazamientos eje vertical Caso 1

## B.2.2. COMPARATIVA CASO 2 DE CARGA

En esta sollicitación, la carga aplicada sobre el hueso astrágalo es de 3600 N.

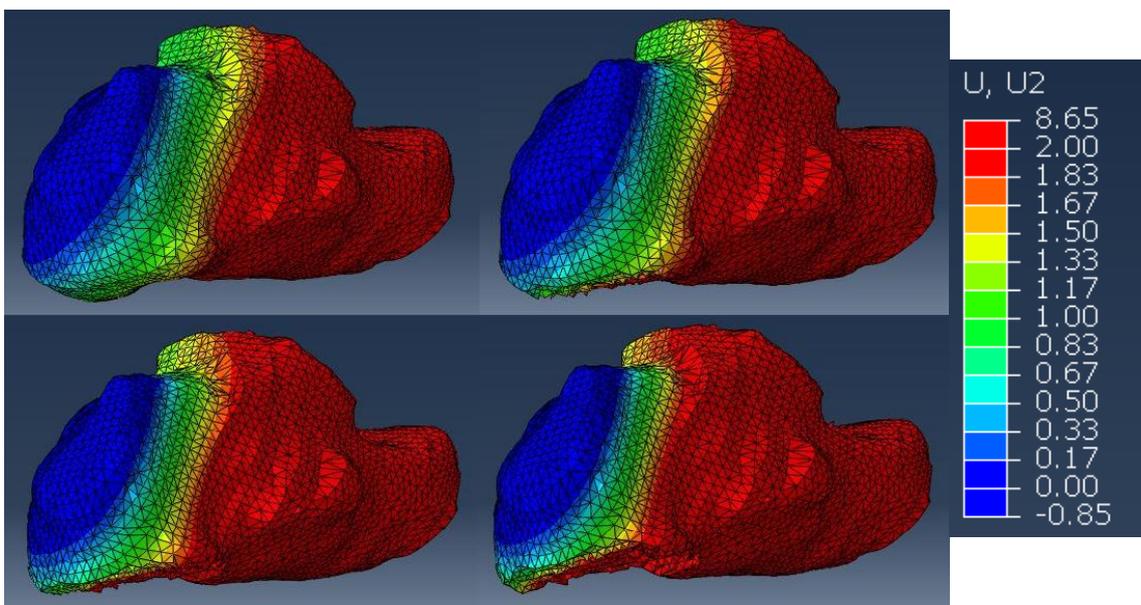


Fig. B.2.1.2 Desplazamientos eje vertical Caso 2

### B.2.3. COMPARATIVA CASO 3 DE CARGA

Por último, y como se ha comentado, este caso **representa un comportamiento crítico** donde **se aplica una carga de 4500 N**.

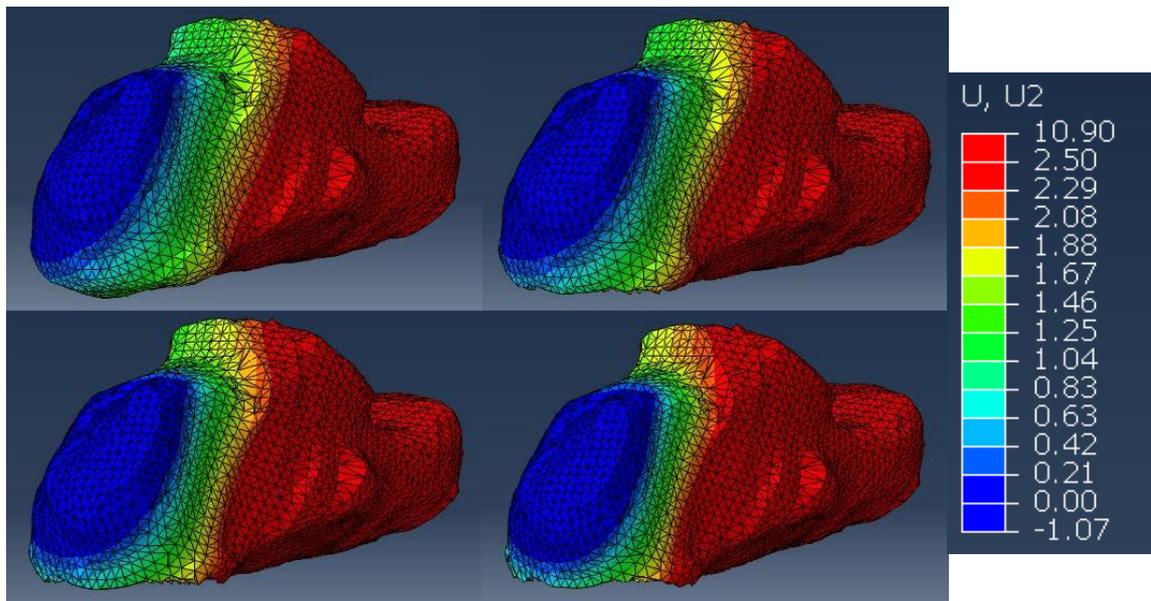


Fig. B.2.1.3 Desplazamientos eje vertical Caso 3

## 7. TABLA DE ILUSTRACIONES

### ESTUDIO DEL ESPOLÓN EN EL HUESO CALCÁNEO

- Figura 2.1: Espolón en el calcáneo .....	8
- Figura 2.2: Situación de la fascia plantar .....	9
- Figura 2.3: Radiografía de un espolón .....	9
- Figura 2.4: Radiografía del pie con el espolón de las simulaciones.....	11
- Figura 2.5: Ablación del espolón con cirugía mínimamente invasiva.....	13
- Figura 2.6: Intervención quirúrgica de eliminación del espolón mediante resección.....	14
- Figura 2.7: Vista perfil del espolón real eliminado y reproducción mallada NX I-DEAS.....	14
- Figura 2.8: Vista en planta del espolón real eliminado y reproducción mallada NX I-DEAS.....	16

### CARACTERIZACIÓN DEL MODELO Y SOLICITACIONES

- Figura 3.1: Malla del modelo “Pie Apoyado” software NX I-DEAS.....	18
- Figura 3.2: Disposición de los apoyos en el modelo “Pie Apoyado” .....	18
- Figura 3.3: Capas del material óseo retirado “Pie Apoyado” .....	20
- Figura 3.4: Resultado hueso calcáneo con material retirado “Pie Apoyado” .....	20
- Figura 3.5: Definición y composición de las cargas aplicadas.....	21
- Figura 3.6: Malla del modelo “Pie Puntillas” software NX I-DEAS .....	23
- Figura 3.7: Situación del apoyo del pie en posición de despegue .....	24
- Figura 3.8: Capas del material óseo retirado “Pie Puntillas” .....	24
- Figura 3.9: Resultado hueso calcáneo con material retirado “Pie Puntillas” .....	25

### TABLAS Y RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES “PIE APOYADO”

- Figura 4.1: Modelo de elementos finitos y representación de ejes para el modelo “Pie Apoyado”.....	28
- Figura 4.2: Resultados tensiones de tracción Caso de Carga 1 .....	29
- Figura 4.3: Resultados tensiones de compresión Caso de Carga 1.....	30
- Figura 4.4: Resultados tensiones de tracción Caso de Carga 2.1.....	30

- Figura 4.5: Resultados tensiones de compresión Caso de Carga 2.1.....31
- Figura 4.6: Resultados tensiones de tracción Caso de Carga 2.2 .....31
- Figura 4.7: Resultados tensiones de compresión Caso de Carga 2.2.....31
- Figura 4.8: Resultados tensiones de tracción Caso de Carga 3.1 .....32
- Figura 4.9: Resultados tensiones de compresión Caso de Carga 3.1.....32
- Figura 4.10: Resultados tensiones de tracción Caso de Carga 3.2.....32
- Figura 4.11: Resultados tensiones de compresión Caso de Carga 3.2.....33
- Figura 4.12: Desplazamientos en el eje vertical Caso de Carga 2.1 .....33
- Figura 4.13: Desplazamientos eje Antero-Posterior Caso de Carga 2.1 .....34
- Tabla resumen de resultados del modelo “Pie Apoyado” .....35

## **TABLAS Y RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES “PIE PUNTILLAS”**

- Figura 4.14: Modelo de elementos finitos y representación de ejes para el modelo “Pie Puntillas” .....36
- Figura 4.15: Resultados tensiones de tracción Caso de Carga 1.....37
- Figura 4.16: Resultados tensiones de compresión Caso de Carga 1 .....37
- Figura 4.17: Resultados tensiones de tracción Caso de Carga 2.....37
- Figura 4.18: Resultados tensiones de compresión Caso de Carga 2 .....38
- Figura 4.19: Resultados tensiones de tracción Caso de Carga 3.....38
- Figura 4.20: Resultados tensiones de compresión Caso de Carga 3.....38
- Figura 4.21: Desplazamientos en el eje vertical Caso de Carga 2.1 .....39
- Tabla resumen de resultados del modelo “Pie Puntillas” .....39

## **ANEXO A – ANÁLISIS GRÁFICO Y NUMÉRICO DE LAS SIMULACIONES DEL MODELO “PIE APOYADO”**

- Figura A.1.1.1: Tensiones de tracción en el eje vertical Caso 1.....45
- Figura A.1.1.2: Tensiones de compresión en el eje Antero-Posterior Caso 1.....46
- Figura A.1.2.1: Tensiones de tracción en el eje vertical Caso 2.1.....46
- Figura A.1.2.2: Tensiones de compresión en el eje Antero-Posterior Caso 2.1..46
- Figura A.1.2.3: Tensiones de tracción en el eje vertical Caso 2.2.....47
- Figura A.1.2.4: Tensiones de compresión en el eje Antero-Posterior Caso 2.2..47
- Figura A.1.3.1: Tensiones de tracción en el eje vertical Caso 3.1.....48
- Figura A.1.3.2: Tensiones de compresión en el eje Antero-Posterior Caso 3.1..48
- Figura A.1.3.3: Tensiones de tracción en el eje vertical Caso 3.2.....49
- Figura A.1.3.4: Tensiones de compresión en el eje Antero-Posterior Caso 3.2..49

- Figura A.2.1.1: Desplazamientos en el eje vertical Caso 1.....50
- Figura A.2.1.2: Desplazamientos en el eje Antero-Posterior Caso 1.....51
- Figura A.2.2.1: Desplazamientos en el eje vertical Caso 2.1.....51
- Figura A.2.2.2: Desplazamientos en el eje Antero-Posterior Caso 2.1.....52
- Figura A.2.2.3: Desplazamientos en el eje vertical Caso 2.2.....52
- Figura A.2.2.4: Desplazamientos en el eje Antero-Posterior Caso 2.2.....53
- Figura A.2.3.1: Desplazamientos en el eje vertical Caso 3.1.....53
- Figura A.2.3.2: Desplazamientos en el eje Antero-Posterior Caso 3.1.....54
- Figura A.2.3.3: Desplazamientos en el eje vertical Caso 3.2.....54
- Figura A.2.3.4: Desplazamientos en el eje Antero-Posterior Caso 3.2 .....55

## **ANEXO B – ANÁLISIS GRÁFICO Y NUMÉRICO DE LAS SIMULACIONES DEL MODELO “PIE PUNTILLAS”**

- Figura B.1.1.1: Tensiones de tracción en el eje vertical Caso 1.....56
- Figura B.1.1.2: Tensiones de compresión en el eje Antero-Posterior Caso 1.....57
- Figura B.1.2.1: Tensiones de tracción en el eje vertical Caso 2.....57
- Figura B.1.2.2: Tensiones de compresión en el eje Antero-Posterior Caso 2.....58
- Figura B.1.3.1: Tensiones de tracción en el eje vertical Caso 3.....58
- Figura B.1.3.2: Tensiones de compresión en el eje Antero-Posterior Caso 3.....59
- Figura B.2.1.1: Desplazamientos en el eje vertical Caso 1.....60
- Figura B.2.1.2: Desplazamientos en el eje vertical Caso 2.....60
- Figura B.2.1.3: Desplazamientos en el eje vertical Caso 3.....61