



**Universidad  
Zaragoza**

## **Trabajo Fin de Grado**

**Análisis del comportamiento mecánico del conjunto  
implante dental-prótesis ubicado en huesos con  
distintas densidades ante cargas fisiológicas**

***Analysis of the mechanical behaviour of the dental  
implant-prosthesis assembly located in bones with  
different densities faced with physiological loads***

**Autora**

**Sara Lairla García**

**Director**

**Javier Bayod López**

**Codirectora**

**María Prados Privado**

**Universidad de Zaragoza**

**Grado en Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo de Producto  
2019**



# ÍNDICE

## ANEXOS

<b>ANEXO 1:</b> Implante dental vs diente natural	65
<b>ANEXO 2:</b> Procedimiento de osteointegración en implantes dentales	66
<b>ANEXO 3:</b> Alternativas a los implantes dentales	67
<b>ANEXO 4:</b> Ventajas e inconvenientes de los implantes dentales	68
<b>ANEXO 5:</b> Técnicas de regeneración ósea	69
<b>ANEXO 6:</b> Importación del modelo en Abaqus CAE	70
<b>ANEXO 7:</b> Asignación de materiales en Abaqus CAE	72
<b>ANEXO 8:</b> Cálculos en el Cluster del i3A de la Universidad de Zaragoza	74
<b>ANEXO 9:</b> Programas utilizados	75
<b>ANEXO 10:</b> Resultados	76
<b>ANEXO 11:</b> Dificultades encontradas	83

**ANEXOS**



## ANEXO 1

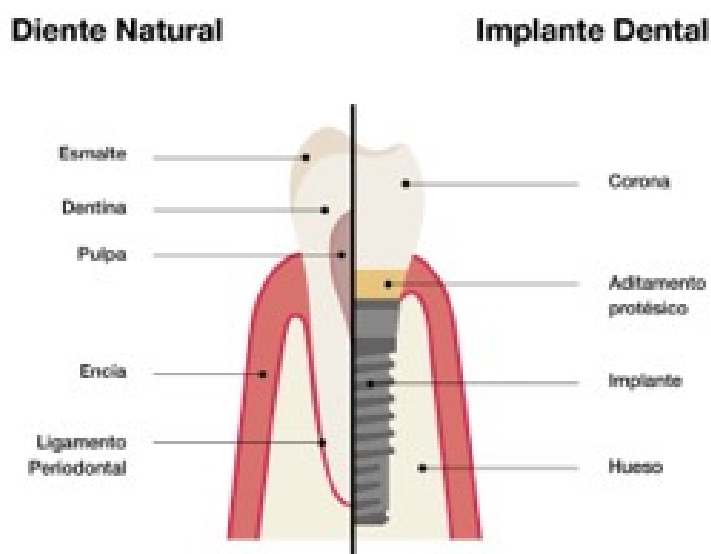


### Implante dental vs diente natural

Las diferencias entre los implantes dentales y los dientes naturales son evidentes, aunque tienen muchas estructuras en común, también tienen aspectos importantes que las diferencian. A continuación se enumeran las diferencias más destacables:

Implante dental vs Diente natural		
Características	Implante dental	Diente natural
Material	El implante está hecho con una aleación de Titanio	El diente es un tejido vivo compuesto por materia orgánica e inorgánica
Conexión al hueso	El implante está conectado por una conexión íntima hueso-implante (osteointegración)	El diente está conectado con el hueso maxilar a través del ligamento periodontal, el cual amortigua las fuerzas de masticación
Estructura	Los implantes dentales suelen constar de 3 partes (implante, pilar y corona)	Los dientes suelen presentar una estructura en bloque

**Tabla 10. Límites elásticos de los materiales [41]**



**Figura 41. Límites elásticos de los materiales [41]**



### *Procedimiento de osteointegración en implantes dentales*

Para que se produzca una adecuada osteointegración entre el implante dental y el hueso del paciente se han de tener en cuenta varios aspectos [7]:

#### **1. Comprobar la estructura ósea del paciente**

El implantólogo deberá comprobar que no se ha producido una disminución de la cantidad de hueso como consecuencia de pasar demasiado tiempo sin dientes o implantes. En el caso de que se haya producido una disminución, es necesario realizar un injerto de hueso que asegure el buen anclaje del implante en el hueso natural del paciente.

#### **2. Verificar la cantidad de espacio disponible donde se colocará el implante**

Cuando se produce la extracción de un diente el espacio que deja la raíz que antes ocupaba dicho diente es diferente dependiendo del tipo de diente, por ejemplo molar o canino. Debido a esto, cuando hay que sustituir un molar por un implante es necesario esperar a que se regenere parte del hueso para que se produzca una adecuada osteointegración.

#### **3. Comprobar que no haya infecciones**

Hay ocasiones en las que es necesario extraer la pieza dental debido a que se ha producido una infección, en estos casos, hay que limpiar las zonas infectadas para evitar que se produzcan problemas durante la osteointegración.

#### **4. Determinar el tamaño, tipo y posición exacta del futuro implante**

Antes de proceder a la colocación del implante hay que saber específicamente qué necesita cada paciente, ya que no todos los pacientes tienen las mismas necesidades en cuanto a implantes dentales. Es necesario hacer un estudio específico para cada persona y determinar el tamaño, tipo y posición exacta que deberá tener el implante.

#### **5. Conocer el historial clínico del paciente**

Es necesario conocer los medicamentos, alergias o enfermedades que tiene el paciente para saber si es conveniente o no la ingesta de algún tipo de medicamento que evite problemas durante la osteointegración.



## ANEXO 3



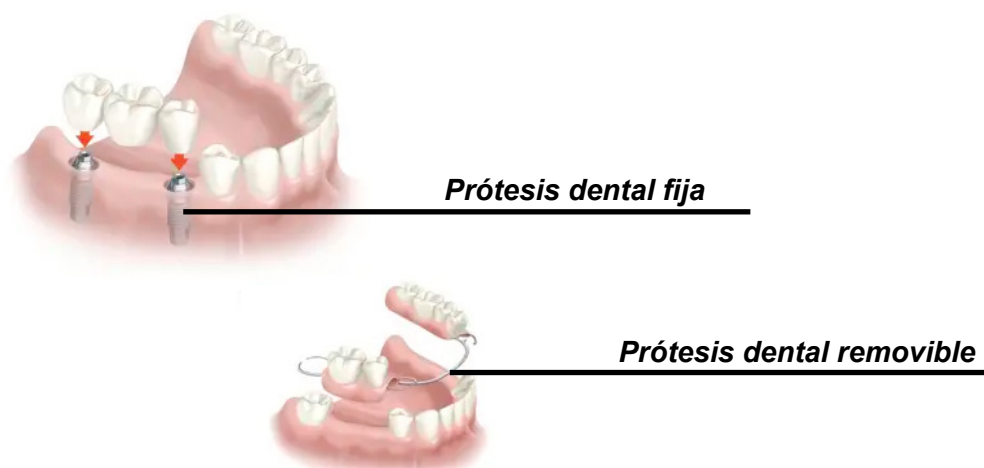
### Alternativas a los implantes dentales

De forma general, se puede afirmar que el implante es la mejor opción siempre y cuando el diagnóstico lo permita. Esto se debe a que de todas las alternativas posibles es lo más parecido a un diente natural y a que previene la pérdida de hueso maxilar. Además, permite la reposición de la pieza ausente conservando la integridad de los dientes adyacentes. En el caso de que no se den las condiciones adecuadas para la colocación de implantes, las alternativas para sustituir los dientes ausentes serían las prótesis fijas y las prótesis removibles [7].

Una **prótesis fija** es una restauración protésica que consiste en sustituir los dientes perdidos mediante una estructura protésica que se sujeta a los dientes adyacentes. Estos dientes se rebajan para dejar espacio a la estructura, y la prótesis se cementa para fijarla. Es un tipo de diseño que lleva utilizándose casi un siglo, y su confort al masticar es excelente. El inconveniente principal es que hay que sacrificar dientes sanos para fijar los dientes ausentes. Actualmente no se recomienda si existe la posibilidad de colocar implantes dentales [7].

Una **prótesis dental removible (también conocida como dentadura postiza)** es una estructura metálica con varios dientes artificiales fijados en sus laterales. Para ofrecer una mejor fijación, las prótesis dentales removibles se anclan a los dientes que el paciente aún conserva en su boca mediante unas sujeciones metálicas. Puede ser retirada por el paciente en cualquier momento, de manera que es más fácil de limpiar. Además, es la opción más económica. Sin embargo, también es la más incómoda, ya que si no está bien ajustada tiende a moverse [7].

En general, las ventajas que presentan los implantes dentales frente a estas alternativas es que ofrecen una **solución duradera, cómoda, natural y estética de reponer los dientes perdidos**. Las ventajas de elegir los implantes son la del **reparto de cargas y no dañar los dientes vecinos**. Si sustituimos una pieza ausente con un implante, el peso que recibe la pieza lo soporta el implante, mientras que el resto de piezas adyacentes reciben su propio peso. De esta manera, las cargas se reparten adecuadamente [7].



**Figura 42. Límites elásticos de los materiales [7]**



### *Ventajas e inconvenientes de los implantes dentales*

A continuación se muestran las principales ventajas e inconvenientes que presentan los implantes dentales [24, 42] :

#### **Ventajas**

- Es la opción más segura, ya que la prótesis va unida al hueso, y no a otros dientes.
- Encajan con comodidad y naturalidad.
- La mejor ventaja del implante dental es que este se trata de una solución duradera y permanente ante la pérdida de dientes. Son mucho más estables que cualquier otra alternativa que pudieran elegir, como por ejemplo las dentaduras convencionales, coronas o puentes dentales.
- Evita la pérdida ósea al conservar la función sobre el hueso.
- La sensación al masticar es similar a la de un diente natural.
- Tiene una gran duración, pueden durar muchos años.
- El hueso está sometido a una fuerza similar al masticar que con los dientes naturales, con lo que permite conservar su forma biológica.
- En casos de pérdida completa de todos los dientes, los implantes dentales son la solución idónea para mejorar la calidad de vida, ya que muchos pacientes que llevan prótesis completas experimentan una dificultad considerable para adaptarse a las dentaduras de quita y pon.
- Ausencia de dolor. En ningún momento del procedimiento se siente dolor ni molestias y, en la mayoría de los casos, el postoperatorio supone menos incomodidades que otras intervenciones más comunes en odontología.
- El mantenimiento de los implantes es similar al que necesitan los demás dientes.
- Los implantes se encajan con precisión en nuestra anatomía por lo que no precisan adhesivos.
- Los implantes evitan dañar los dientes sanos de alrededor.

#### **Inconvenientes**

- Los implantes dentales, en ocasiones, pueden resultar algo costosos.
- Existe la posibilidad de que el hueso rechace el implante.
- La cirugía puede causar dolor, hinchazón o sangrado.
- Infección debido a roturas y flacidez.





### Técnicas de regeneración ósea

Existen ocasiones en las que el hueso no se encuentra en un estado adecuado, por ello, para poder colocar un implante dental, es necesario que se produzca una regeneración ósea. Para que un implante tenga éxito, la calidad del implante es fundamental [24]. Si no existe una buena superficie de agarre, es muy difícil que el implante se mantenga en la boca del paciente.

Los odontólogos escogen la técnica más adecuada para la regeneración ósea en función de la cantidad de hueso a restablecer y del lugar donde se haya perdido masa ósea. Las técnicas más utilizadas son las siguientes:

- **Injerto óseo:** En esta técnica, el cirujano se encarga de reponer el hueso perdido para obtener el suficiente y así poder colocar el implante. Este hueso puede proceder del propio paciente obteniéndolo de una zona del cuerpo (de dentro o fuera de la boca), de un donante o mediante el empleo de sustitutos óseos comercializados (de origen animal, vegetal o sintético) siempre que sean compatibles biológicamente [43].

Estos injertos permiten aumentar tanto la anchura como la altura del hueso maxilar donde se va a colocar el implante. Son muy utilizados principalmente en los maxilares, utilizando una técnica conocida como '**Elevación del seno maxilar**' [24].

- **Plasma rico en factores de crecimiento:** Esta técnica consiste en extraer una pequeña cantidad de sangre al paciente [43] de la que se obtienen los factores de crecimiento, que son proteínas que se encuentran en nuestra sangre. Estas proteínas son aplicadas a la zona que ósea que se desea regenerar.

Las ventajas de esta técnica es que la integración del implante en el hueso es más rápida, no se necesita operar y reduce la inflamación y el dolor.

Para la elección de un procedimiento u otro el odontólogo debe realizar pruebas que le ayuden a valorar y tomar la decisión de cuál de las técnicas es más efectiva en cada caso. Incluso en ocasiones puede que el odontólogo combine varios procedimientos con el fin de obtener un resultado óptimo [42].



### Importación del modelo en Abaqus

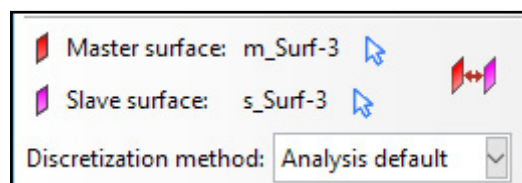
A la hora de importar el modelo en Abaqus empecé a tener problemas. El modelo lo exporté a formato 'Parasolid' ya que es un formato que Abaqus acepta. Al ir a importar el modelo el programa lo aceptaba pero no me consideraba las restricciones de posición y de contacto entre las piezas que se habían introducido en el programa SolidWorks. En Abaqus hay una operación (Merge) que permite seleccionar las partes del modelo y mantenerlas restringidas unas con otras considerándolas unidas, como un ensamblaje. El problema era que tampoco dejaba aplicar esta operación porque al hacerla se eliminaba el componente del hueso (Figura 43).



**Figura 43. Error al importar el modelo en Abaqus (desaparece el hueso)**

La conclusión que obtuve de este error tras muchos intentos y muchas pruebas, fue que como el hueso y la corona están diseñadas con la operación 'Molde' de SolidWorks (Ver apartado 3.1 de la Memoria), al importarlo a Abaqus convertía los contornos curvos de los filetes de la rosca del cuerpo del implante en líneas rectas, y hacía lo mismo en el agujero roscado del hueso. Debido a esto, las líneas rectas de la rosca del implante se intersectaban dentro del hueso, y las del hueso dentro del implante.

Finalmente, encontré una solución investigando en diferentes foros y tutoriales de ayuda de Abaqus. La solución consiste en utilizar una herramienta que posee el programa llamada 'Constraints'. Esta herramienta se aplica a las zonas que queremos que las considere que están en contacto. Se selecciona por un lado lo que se conoce como 'master surface' y por otro lado la 'slave surface' (Ver Figura 44).

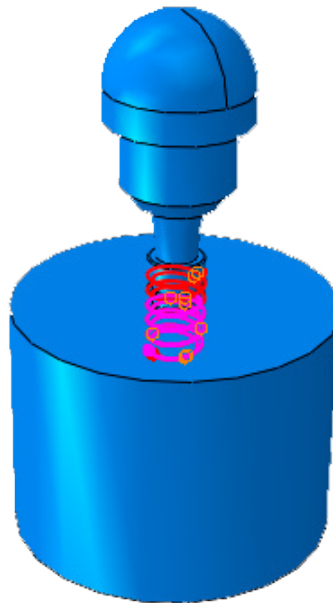


**Figura 44. Operación 'Constraints'**



En el modelo se aplicaron '*Constraints*' solo en las zonas que daba error al hacer la operación '*Merge*'. Estas zonas eran el implante con el hueso. Se seleccionaron las caras inferiores de cada filete de la rosca del implante e incluso la base del cuerpo del implante y luego se seleccionaron las zonas que iban a estar concontacto con estas zonas previamente seleccionadas. Las zonas con las que iban a estar en contacto eran las caras de la rosca del agujero roscado del hueso. Como no pude seleccionar todas las caras en una misma operación, las caras que me faltaban por seleccionar las iba añadiendo en otro constraint. Se pueden añadir tantos constraints como se quieran siempre y cuando en cada uno se seleccionen las caras de uno de los modelos que van a estar en contacto con las mismas caras en el otro modelo.

Las caras seleccionadas en la '*Master Surface*' son las que aparecen en la *Figura 45* de color rojo, y las seleccionadas en la '*Slave Surface*' aparecen de color rosa.



**Figura 45. Ejemplo de caras seleccionadas con la operación '*Constraint*'**

Una vez que Abaqus ya consideraba el modelo ensamblado conservando las restricciones de posición en todos sus componentes, se mandó el modelo a calcular al cluster de la Universidad de Zaragoza y se obtuvieron resultados válidos para el proyecto.

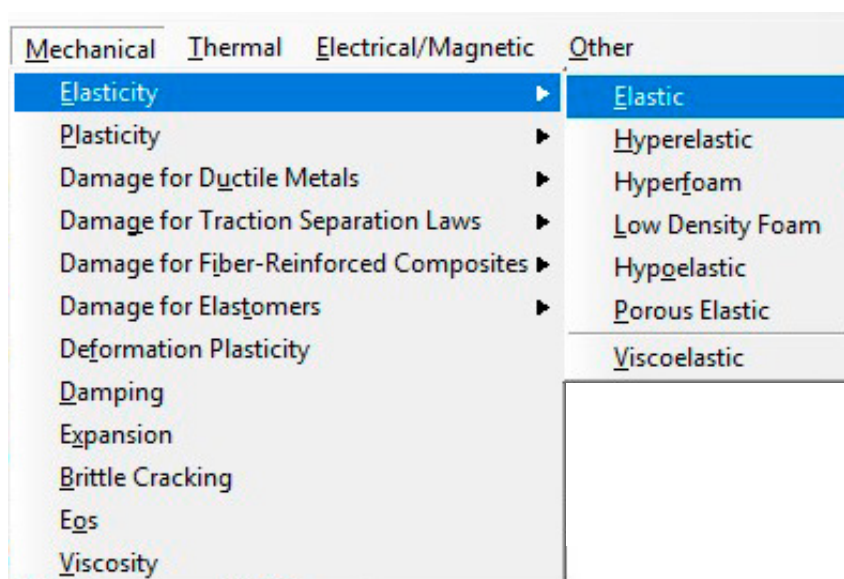
El resolver este problema costó más tiempo del esperado, estuve probando diferentes soluciones más de dos meses sin obtener ningún resultado, hasta que encontré esta solución que me ha ayudado a poder continuar con el proyecto.



Para realizar el análisis estático del ensamblaje completo es imprescindible la aplicación de materiales a cada uno de los componentes, ya que el material define el comportamiento de los modelos.

Los materiales se han aplicado en Abaqus y para ello ha sido necesario crear en el apartado de 'Materials' los tres materiales que se han aplicado a la geometría. Estos tres materiales se han definido en el apartado 3.2 de la Memoria. Para cada uno de ellos ha sido necesario definir de que tipo de análisis se trata y los valores del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de cada uno de ellos.

En primer lugar se debe definir el comportamiento del material. En esta caso todos los materiales que se han utilizado poseen un **comportamiento mecánico elástico**, para definirlo en Abaqus ver *Figura 46*.



**Figura 46. Definición del comportamiento del material en Abaqus**

En segundo lugar, al definir el comportamiento del material, se introducen los valores del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson como se muestra en la *Figura 47*. Una vez están todos los materiales creados el siguiente paso es asignar cada material al componente correspondiente.

Young's Modulus	Poisson's Ratio
100000	0.3

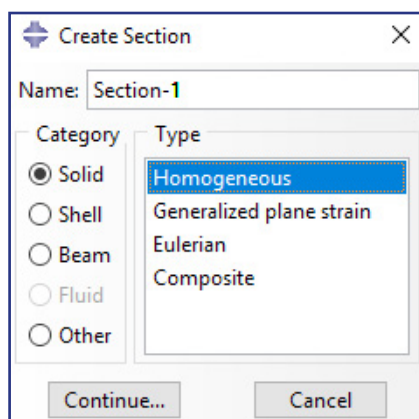
**Figura 47. Definición de las propiedades del material en Abaqus**



### Asignación de materiales en Abaqus CAE

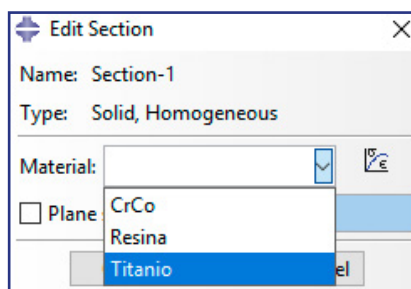
Para poder asignar los materiales a los diferentes componentes del modelo, primero deben estar creados, como se ha añadido en la página anterior.

Antes de asignar los materiales hay que crear lo que se conoce como 'sections'. Para crear una sección hay que darle un nombre, generalmente se le da el nombre el componente al que se le va a aplicar la sección con uno de los materiales creados, y hay que definir el tipo de sección que es. En este caso todas las secciones que se han creado son del tipo homogéneo (ver *Figura 48*).



**Figura 48. Definición de la sección**

Una vez definido el tipo de sección se tiene que seleccionar el material (ver *Figura 49*) que va a tener esa sección y el componente al que se le va a aplicar esa sección.



**Figura 49. Selección del material para la sección**

Se creara una sección para cada componente. En este caso tenemos cinco secciones una para cada componente (corona, hueso, cuerpo del implante, pilar y tornillo). Otra posible alternativa sería asignar solo tres secciones (una para cada material), ya que tres de los componentes poseen el mismo material (aleación de Titanio); pero para observar los resultados tensionales es mejor aplicar una sección a cada componente aunque haya varios que sean del mismo material.



## ANEXO 8

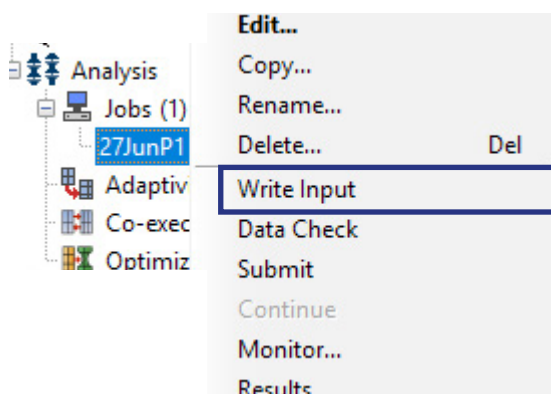


### Cálculos en el Cluster del i3A de la Universidad de Zaragoza

Una vez se tenía el modelo completo en Abaqus, habiendo utilizado la operación '*Constraints*' (Anexo 6) para que no diera error y eliminara algún componente del modelo. Se aplicaron los materiales y se asignaron secciones a cada componente (Anexo 7), se aplicaron las condiciones de contorno y se realizó el mallado (Ver apartado 3 de la memoria). Con todos estos pasos completos ya se podía mandar el modelo a calcular.

El proceso que se seguía cada vez que se quería mandar un cálculo para obtener los resultados de tensiones del modelo era el que se va a comentar a continuación.

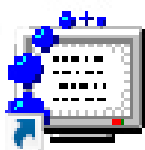
En el apartado de '*Analysis*' de Abaqus se crea un '*Job*' y se le asigna un nombre (el nombre tiene que ser diferente cada vez que se crea un '*job*'). Cuando lo tenemos creado se hace click con el botón derecho del ratón sobre el job creado y se selecciona la acción de '*Write Input*' (Figura 50). Al seleccionar esta acción se crea un archivo '*.inp*' que es el que introduciremos en el programa '*SSH Secure Shell*' (Figura 51) que es el que nos permite enviar los cálculos.



**Figura 50. Como crear el archivo para enviar a calcular al cluster**

Para acceder a este programa, es necesario introducir mi licencia con mi nombre y contraseña. Una vez ya se ha accedido solo hay que arrastrar el modelo '*.inp*' que ha creado Abaqus y se envía a calcular al Cluster del i3A de la Universidad de Zaragoza.

La duración del cálculo depende de la geometría y de las condiciones de contorno que se han aplicado al modelo en Abaqus.



**Figura 51. Programa SSH Secure Shell**



### Programas utilizados

En este apartado se muestran todos los programas utilizados para la realización del proyecto de los cuales todas las licencias han sido proporcionadas por la universidad.



**Figura 52. Programa Solidworks**

El programa **SolidWorks** (Figura 52) se ha utilizado por un lado, para el modelo de los componentes del hueso y de la corona; y por otro lado, para realizar el ensamblaje final del modelo colocando todas las restricciones de posición necesarias entre las piezas.



**Figura 53. Programa Abaqus CAE**

El programa de elementos finitos **Abaqus CAE** (Figura 53) se ha utilizado para realizar los análisis de tensiones y de deformaciones. Para ello se han aplicado los materiales, condiciones de contorno y se ha realizado el mallado de la geometría en este programa.



**Figura 54. Programa SSH Secure Shell**

El programa **SSH Secure Shell** (Figura 54) se ha utilizado para enviar los cálculos creados en Abaqus al cluser del i3A de la universidad de Zaragoza, ya que se requiere de mucha capacidad de procesador.



**Figura 55. Programa Microsoft Word**

**Microsoft Office Word** (Figura 55) se ha utilizado para la recopilación de información y para servir del orden que van a seguir los apartados.



**Figura 56. Programa Adobe Indesign**

Se ha utilizado el programa de **Adobe InDesign** (Figura 56) para la maquetación de la memoria y de los anexos, así como de la presentación del proyecto.



**Figura 57. Programa Adobe Photoshop**

**Adobe Photoshop** (Figura 57) se ha utilizado para el retoque de imágenes.

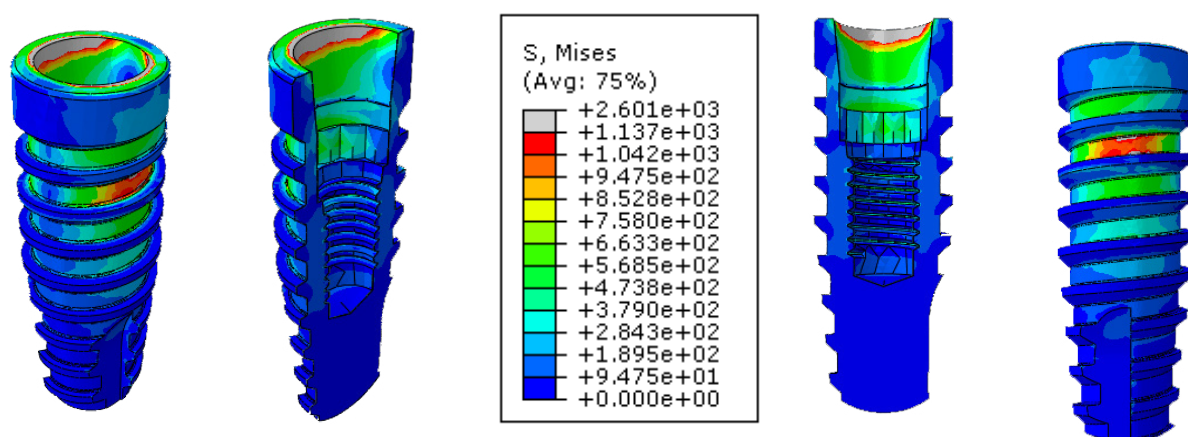




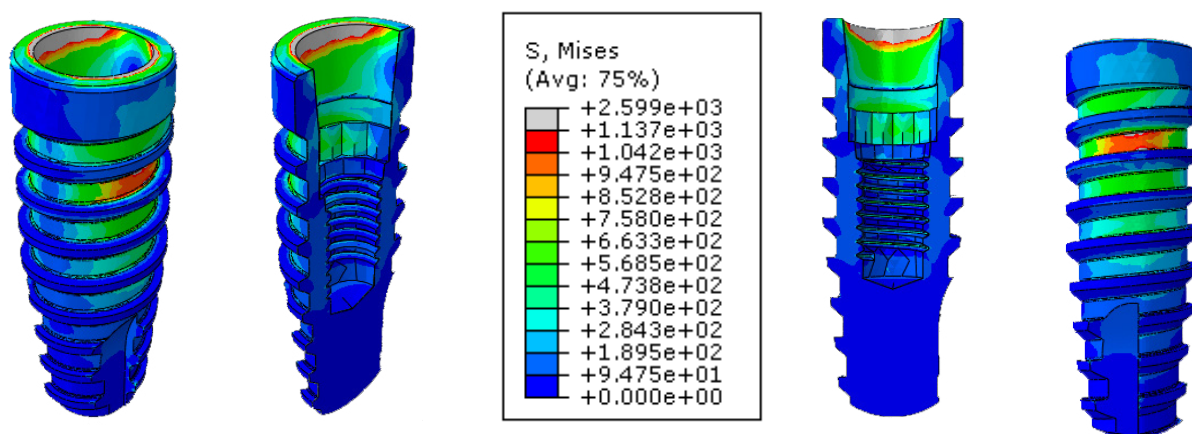
En las siguientes figuras se observan los resultados obtenidos de tensiones y deformaciones. Todos los valores de las tensiones están expresados en MPa. En los mapas de las tensiones hay límites superior e inferior con el fin de mejorar la visualización de los resultados sobre el modelo.

Las figuras se van a ordenar según componente. De cada componente se van a observar figuras (Figuras 58 - 77) de cada uno de las densidades por separado para apreciar mejor las diferencias entre ellas.

### CUERPO DEL IMPLANTE

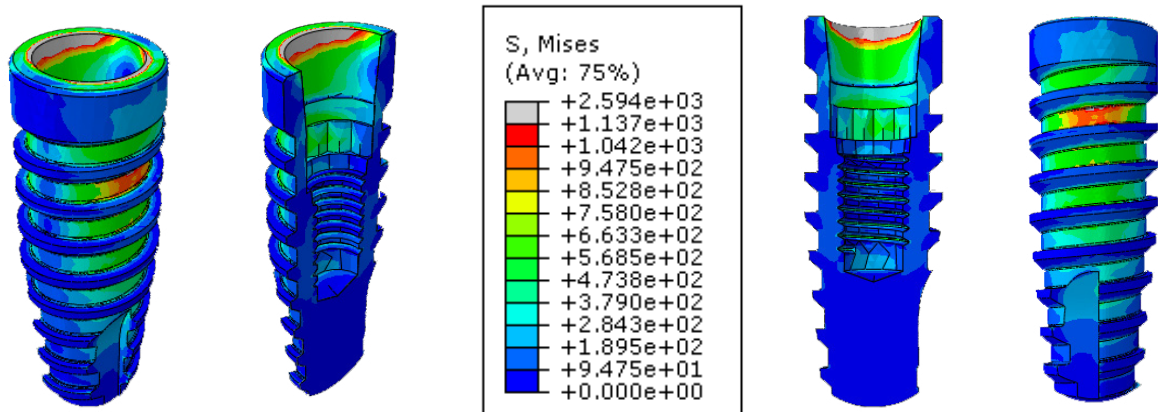


**Figura 58. Cuerpo del implante (Densidad 1) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**

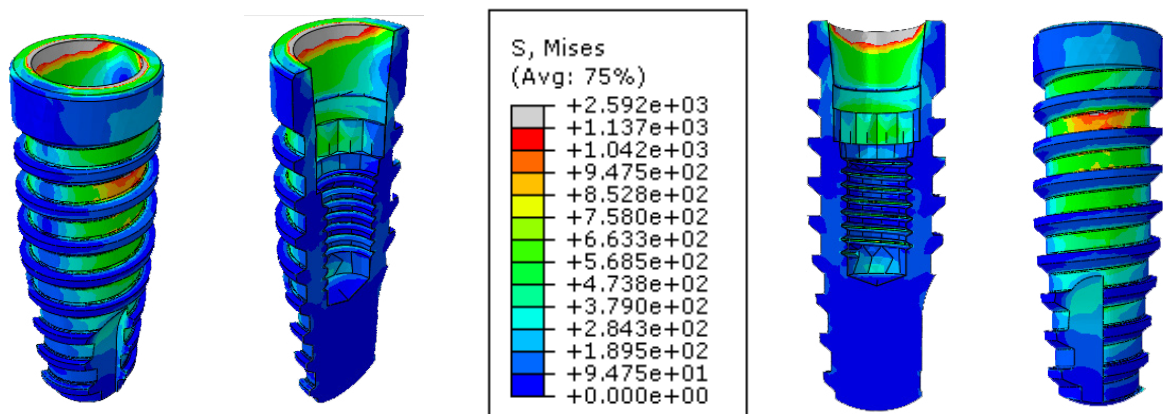


**Figura 59. Cuerpo del implante (Densidad 2) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**



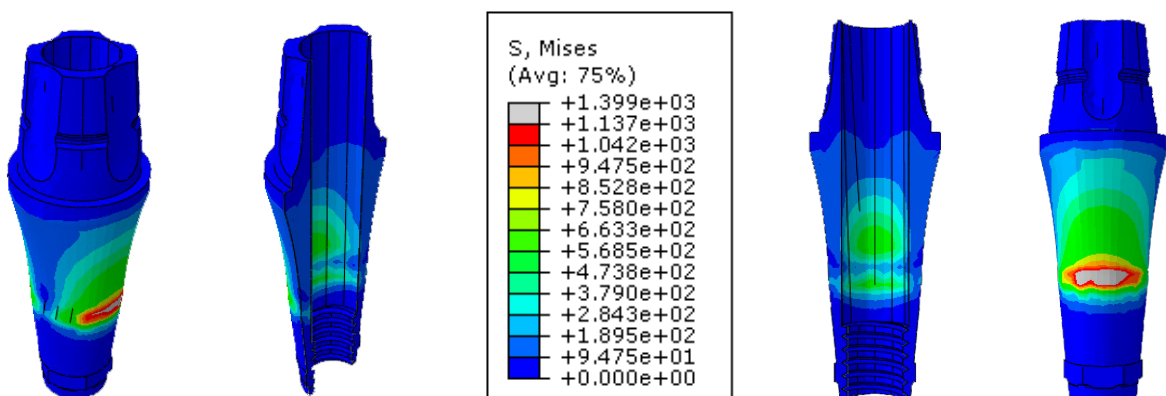


**Figura 60. Cuerpo del implante (Densidad 3) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**

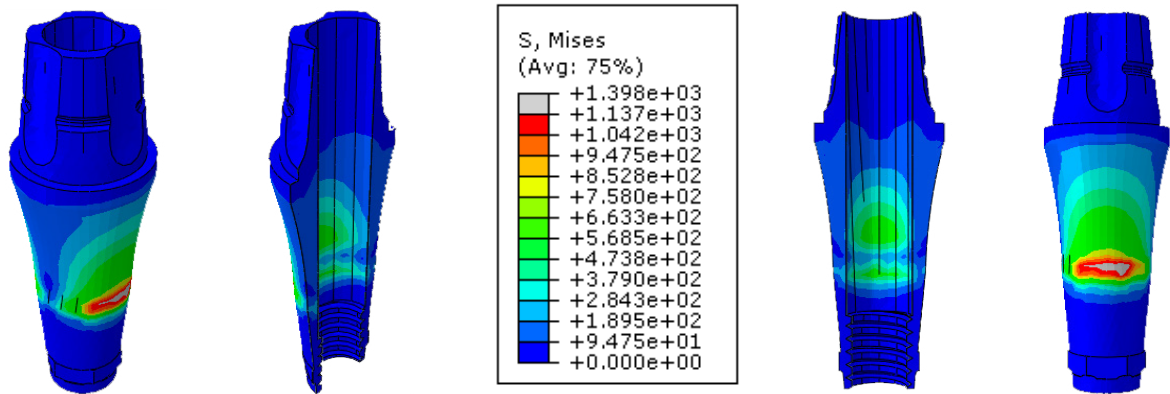


**Figura 61. Cuerpo del implante (Densidad 4) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**

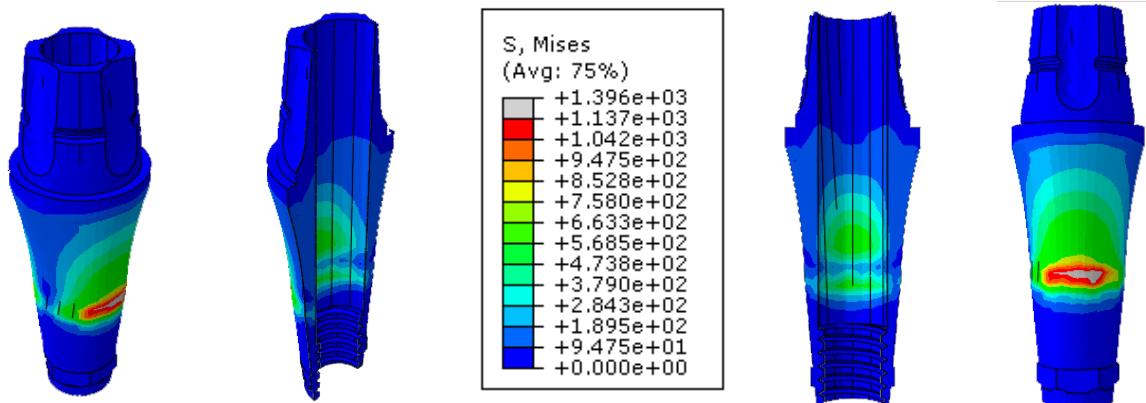
### PILAR DEL IMPLANTE



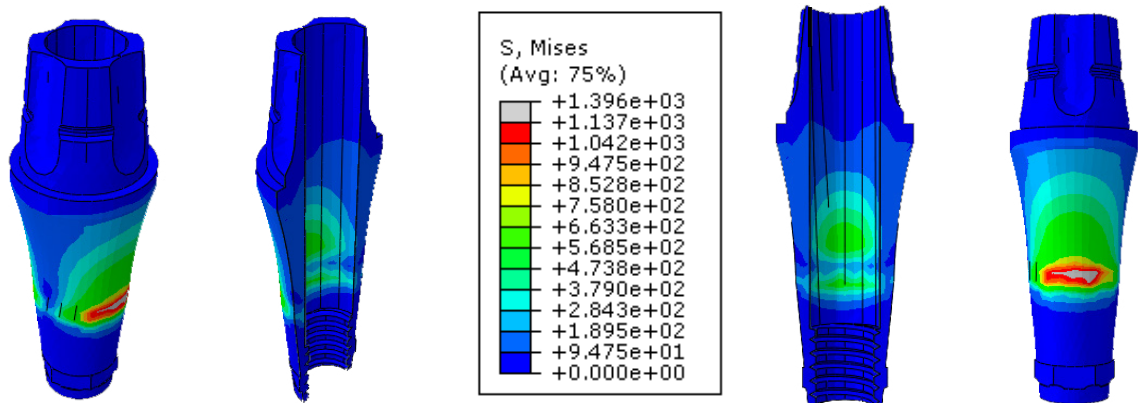
**Figura 62. Pilar del implante (Densidad 1) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**



**Figura 63. Pilar del implante (Densidad 2) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**



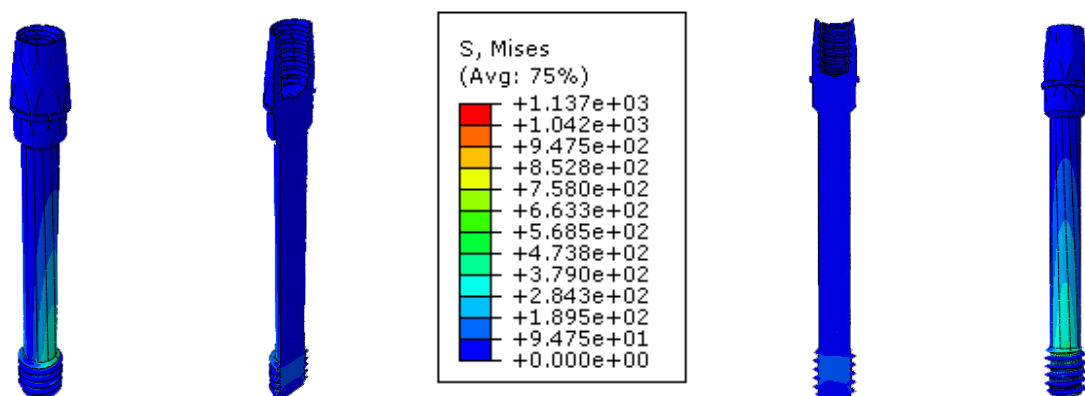
**Figura 64. Pilar del implante (Densidad 3) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**



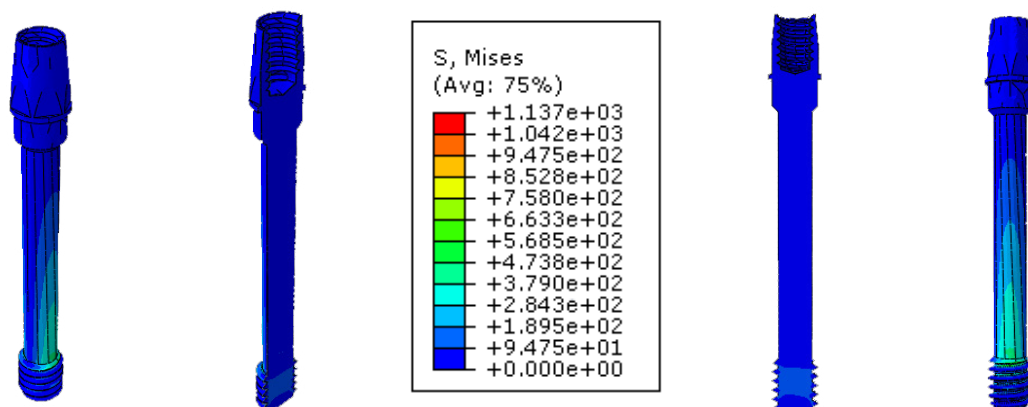
**Figura 65. Pilar del implante (Densidad 4) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**



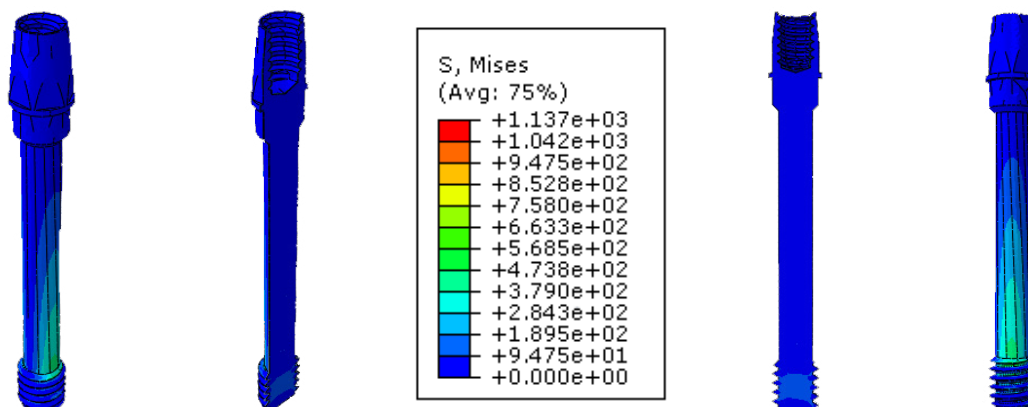
### TORNILLO DEL IMPLANTE



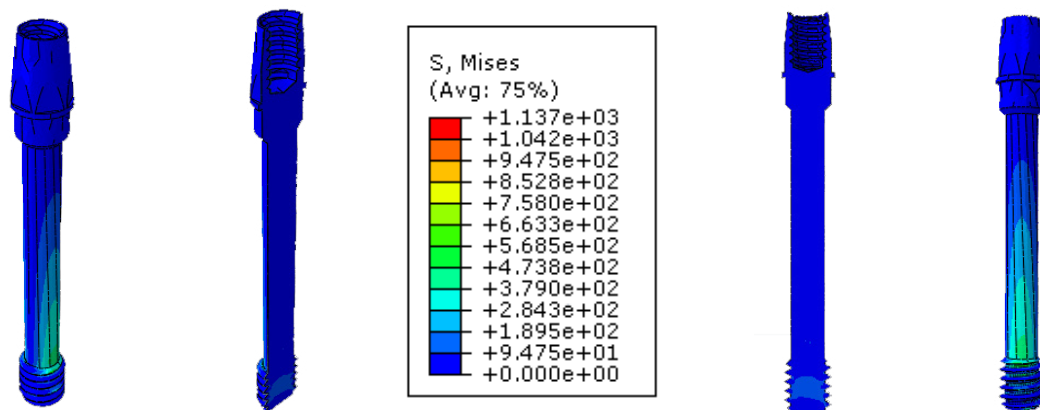
**Figura 66. Tornillo del implante (Densidad 1) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**



**Figura 67. Tornillo del implante (Densidad 2) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**

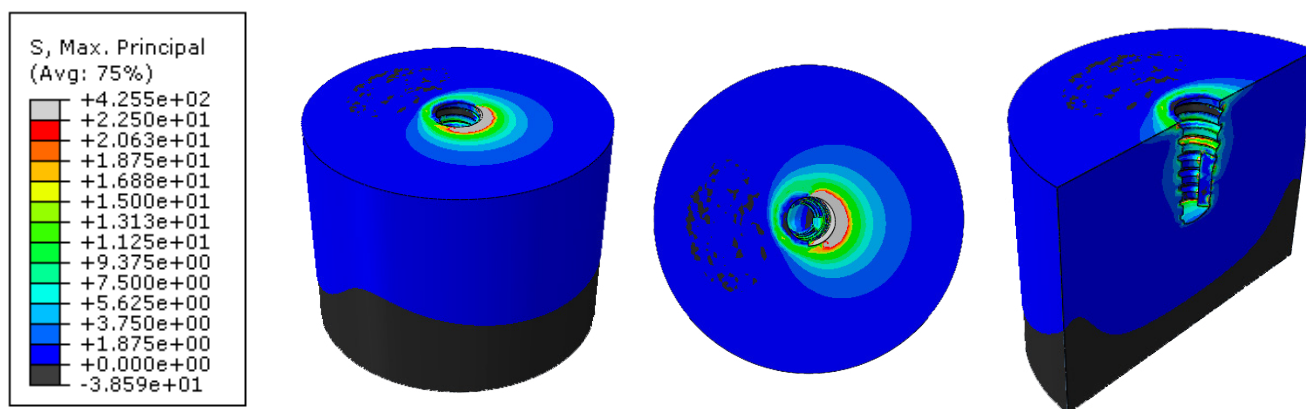


**Figura 68. Tornillo del implante (Densidad 3) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**

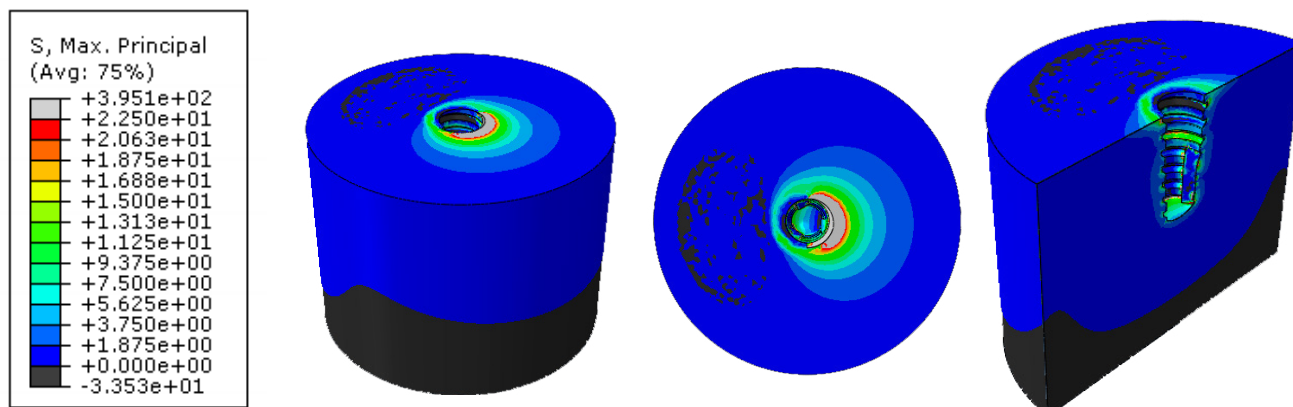


**Figura 69. Tornillo del implante (Densidad 4) - Tensiones de Von Mises tomando como límite superior el límite elástico de la aleación de titanio(1137 MPa)**

## HUESO

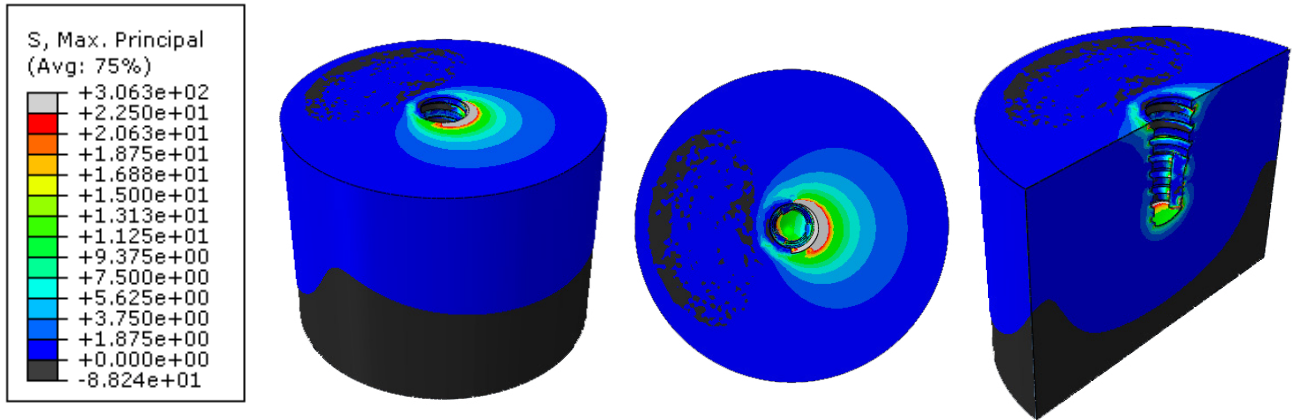


**Figura 70. Hueso (Densidad 1) - Tensiones Principales Máximas (MPa)**

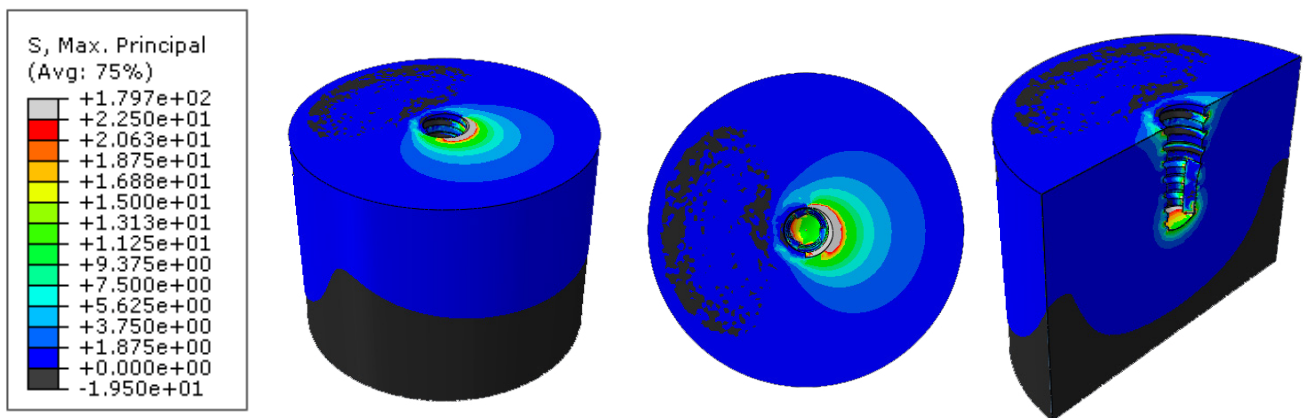


**Figura 71. Hueso (Densidad 2) - Tensiones Principales Máximas (MPa)**

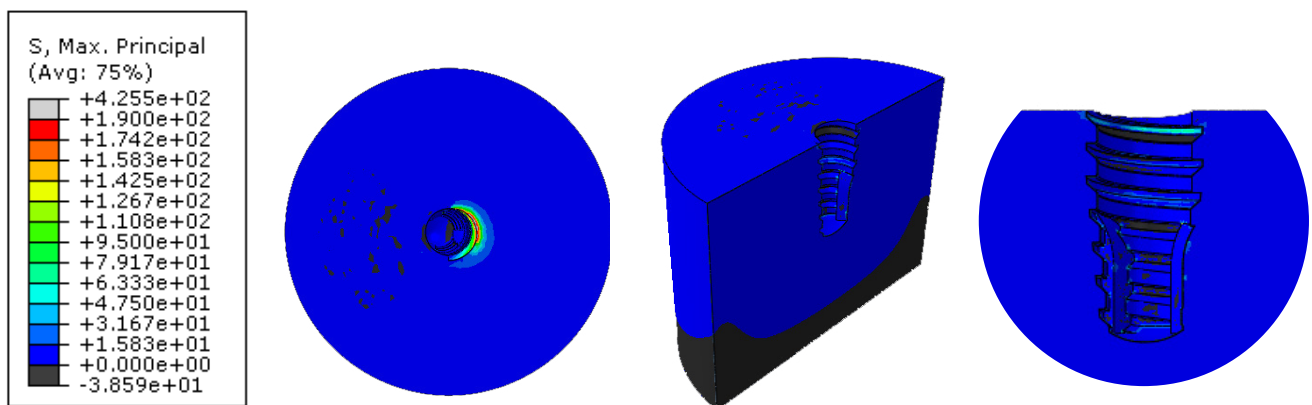




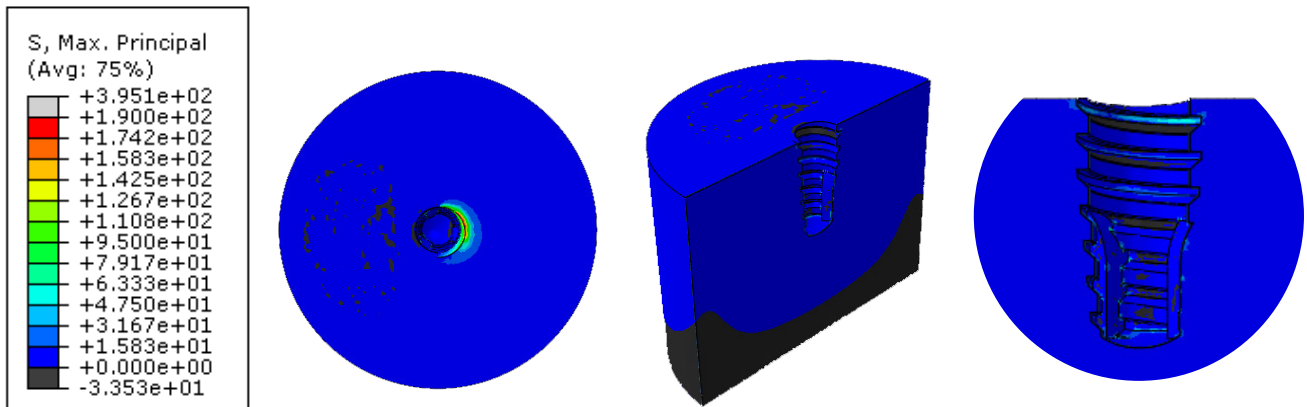
**Figura 72. Hueso (Densidad 3) - Tensiones Principales Máximas (MPa)**



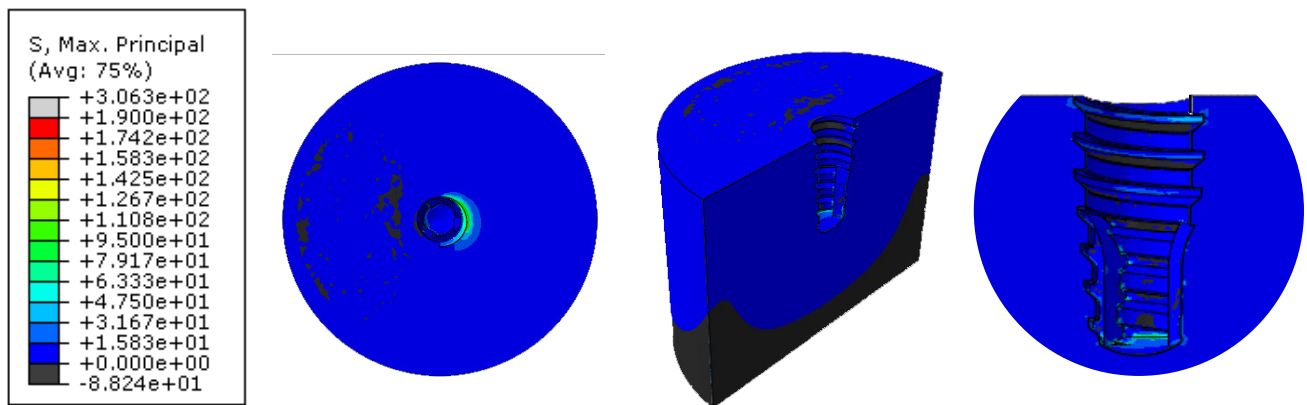
**Figura 73. Hueso (Densidad 4) - Tensiones Principales Máximas (MPa)**



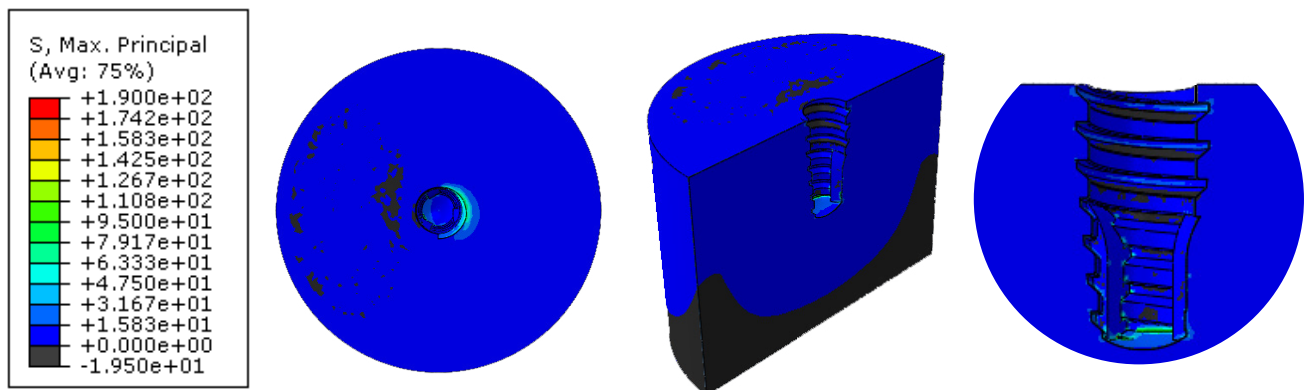
**Figura 74. Hueso (Densidad 1) - Tensiones Principales Máximas tomando como límite superior el límite elástico del hueso (MPa)**



**Figura 75. Hueso (Densidad 2) - Tensiones Principales Máximas tomando como límite superior el límite elástico del hueso (MPa)**



**Figura 76. Hueso (Densidad 3) - Tensiones Principales Máximas tomando como límite superior el límite elástico del hueso (MPa)**



**Figura 77. Hueso (Densidad 4) - Tensiones Principales Máximas tomando como límite superior el límite elástico del hueso (MPa)**



### *Dificultades encontradas*

En este apartado también se detallan conclusiones relacionadas con aspectos como el tiempo empleado, los problemas encontrados, la experiencia y la opinión personal.

El proyecto se comenzó en el mes de septiembre de 2018. Inicialmente solo se recopiló información sobre implantes dentales y la terminología utilizada en este campo de aplicación, es decir, el apartado 2 de la memoria. A partir de Febrero fue cuando se empezó a realizar los diferentes ensamblajes y modelado de los componentes y la aplicación de las condiciones de contorno. Todo esto se finalizó en Abril.

El problema llegó a la hora de enviar los cálculos al Cluster del i3A, ya que se quedaba más de 24 horas calculando y no obtenía ningún resultado. Hasta finales de Junio no se solucionó este problema que era debido a que surgían dificultades a la hora de importar el modelo en Abaqus, como se explica en el *Anexo 6*. Principalmente, este fue uno de los problemas más importantes que han surgido en el proyecto, debido a que se perdió mucho tiempo en intentar solucionarlo.

El proyecto ha servido para poder obtener experiencia en el campo de los implantes dentales, en la utilización de programas como Abaqus CAE y en la aplicación de los conocimientos obtenidos en mi titulación tanto de diseño como de resistencia de materiales, que son los puntos claves del proyecto.

En general, me alegro de haber apostado por este proyecto, a pesar de los problemas que se han presentado, ya que he aprendido mucho gracias a mis dos tutores.

