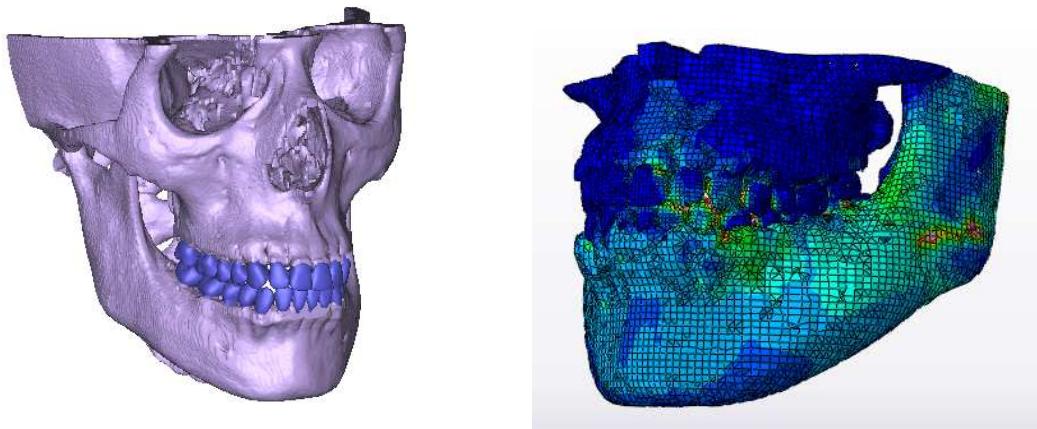




Escuela Universitaria
de Ingeniería Técnica
Industrial de Zaragoza

PROYECTO FIN DE CARRERA

Simulación por elementos finitos de la mecánica de
la masticación



Autor
Óscar Ibáñez Félez
Dirigido por
Amaya Pérez del Palomar Aldea

Área de Mecánica y Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial
Universidad de Zaragoza

Zaragoza, Mayo de 2011

Agradecimientos

Quisiera dar las gracias en primer lugar a Amaya Pérez del Palomar no solo por ofrecerme la posibilidad de realizar este proyecto, sino por su paciencia, ayuda, apoyo, ánimos y un sinfín de razones que han hecho posible su finalización.

A mi familia, de la cual me siento orgulloso, en especial de los que más me han sufrido que son mi madre, mi hermana, mi cuñado y mi novia, sin olvidarme de una personita que desde hace poco forma parte de nuestra vida, mi sobrina Blanca.

A todos mis amigos, haciendo una mención especial a la futura Dr. Ana María Palacín, que me asesoró en gran parte de este proyecto y a Quique, sin el cual ahora mismo no estaría redactando este proyecto.

Me gustaría nombrar de una manera más emotiva a mis abuelos Martín y Pilar y a mis tíos Felipe y Mari, “siempre os llevaré en el corazón”.

Índice General

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivo.....	2
1.2 Metodología del Proyecto.....	3
2. Descripción de la anatomía de la mandíbula.....	4
2.1 Huesos de la cara.....	4
2.1.1 Maxilar Superior.....	5
2.1.2 Maxilar inferior.....	6
2.2 Los dientes (persona adulta).....	8
2.2.1 Partes del diente	8
2.2.2 Tipos	10
2.3 Músculos Masticadores.....	11
2.4 Biomecánica de la mandíbula.....	12
3. Generación de los modelos de elementos finitos	20
3.1 Generación del modelo sólido de dientes, hueso y ligamentos.....	20
3.2 Modelo de EF de dientes, hueso y ligamentos.....	22
3.3 Material.....	25
3.4 Condiciones de contorno	25
4. Resultados	27
4.1 Acción de los músculos maseteros y temporales.....	27
4.1.1 Maseteros y temporales	27
4.1.2 Masetero y temporal derecho	29
4.1.3 Masetero y temporal izquierdo.....	32
4.2 Acción solamente de los temporales	34
4.2.1 Los dos temporales	34
4.2.2 Solo temporal derecho.....	36
4.2.3 Solo temporal izquierdo	38
4.3 Acción solamente de los maseteros.....	41
4.3.1 Los dos maseteros.....	41
4.3.2 Solo masetero derecho	43
4.3.3 Solo masetero izquierdo	45
5. Conclusiones	51
6. Limitaciones.....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

1. Introducción

La Biomecánica es la Mecánica aplicada a la Biología, es decir, la disciplina que intenta predecir la mecánica de los sistemas vivos. Esta ciencia ayuda a entender el funcionamiento habitual de los organismos, a caracterizar el comportamiento de tejidos y órganos vivos desde el punto de vista mecánico, a predecir los cambios que sufren debido a alteraciones y a proponer métodos de intervención artificial. Por ello, la diagnosis, la cirugía y el diseño de prótesis se encuentran directamente relacionados con ella.

En los últimos cuarenta años, esta disciplina mostró los beneficios del enfoque mecánico en la descripción de los objetos de la biología y la medicina, y la potencia del trabajo multidisciplinario. No sólo ha crecido produciendo resultados tanto en el campo teórico como en el de las aplicaciones, sino que ha extendido sus incumbencias.

Dentro de la investigación básica trata de determinar las propiedades y características de los materiales biológicos y su dependencia respecto de las condiciones externas, las respuestas a distinto tipo de solicitudes, sus interacciones para formar sistemas, su capacidad de asociarse con materiales no biológicos, etc. Las propiedades y características de los sistemas biológicos y mixtos y sus aplicaciones. Tiene que ver con las ramas que la originaron: la mecánica, la biología y la medicina.

En cuanto a la investigación aplicada, es el pilar de la deportología, la accidentología y la ergonomía. Trabaja a distintas escalas; trata de explicar el crecimiento y de modelar la rehabilitación. Establece condicione para biocompatibilidad, osteointegración o biofidelidad. Generaliza resultados particulares, produce analogías, valida modelos de respuestas.

Casi todos sus resultados son transferidos rápidamente a la sociedad, muchos de ellos se generan a propósito para satisfacer necesidades

del mercado. En general, busca que algunas actividades de la vida puedan realizarse en forma más cómoda, más rápida, más eficiente. Una de las mayores dificultades con las que se encuentra la Biomecánica es la reconstrucción, en la mayoría de las ocasiones compleja, de la geometría del órgano a estudio de una forma automatizada. Para ello se están utilizando potentes herramientas de visualización gráfica y representación geométrica.

1.1 Objetivo

El presente proyecto trata sobre la simulación por elementos finitos de la acción de masticación de una mandíbula perteneciente a una mujer adulta, en la etapa final de cierre, es decir, cuando los dientes del maxilar inferior y los del maxilar superior están en contacto. No solamente se realizará el estudio para una persona sana que puede hacer uso de todos los músculos que intervienen en la acción de masticación (maseteros y temporales), sino que también se barajarán hipótesis con sus respectivas pruebas y estudios para distintos casos en los que dichos músculos estuvieran afectados, ya sea por algún tipo de traumatismo, parálisis, etc.

El desarrollo y estudio del proyecto ha sido realizado en la Universidad de Zaragoza, en el departamento de Ingeniería Mecánica.

Los objetivos principales del proyecto son los siguientes:

- Desarrollar un modelo de EF válido para simular la acción de masticación.

- Analizar distintas hipótesis donde se tendrá en cuenta si los músculos (maseteros y temporales), están afectados o no.

Una vez obtenidos los resultados, se podrá observar y valorar cómo reacciona la mandíbula, sobretodo, cómo afecta a los dientes (desplazamientos, tensiones, etc.).

1.2 Metodología del Proyecto

Para la realización del proyecto se ha procedido según los siguientes pasos:

1. Reconstrucción de la geometría en tres dimensiones de toda la mandíbula a partir de imágenes de Tomografía Axial Computerizada (TAC).
2. Elaboración de la malla de elementos finitos de las partes que formarán la mandíbula (hueso, ligamentos y dientes).
3. Validación del modelo
4. Análisis de las distintas hipótesis planteadas.
5. Análisis de los resultados y conclusiones.

2. Descripción de la anatomía de la mandíbula

2.1 Huesos de la cara

Los huesos de la cara se dividen en pares e impares:

- **Pares**
 - Huesos nasales
 - Maxilares superiores
 - Malares
 - Unguis
 - Cornetes internos
 - Palatino
- **Impares**
 - Vómer
 - Mandíbula (Maxilar inferior)

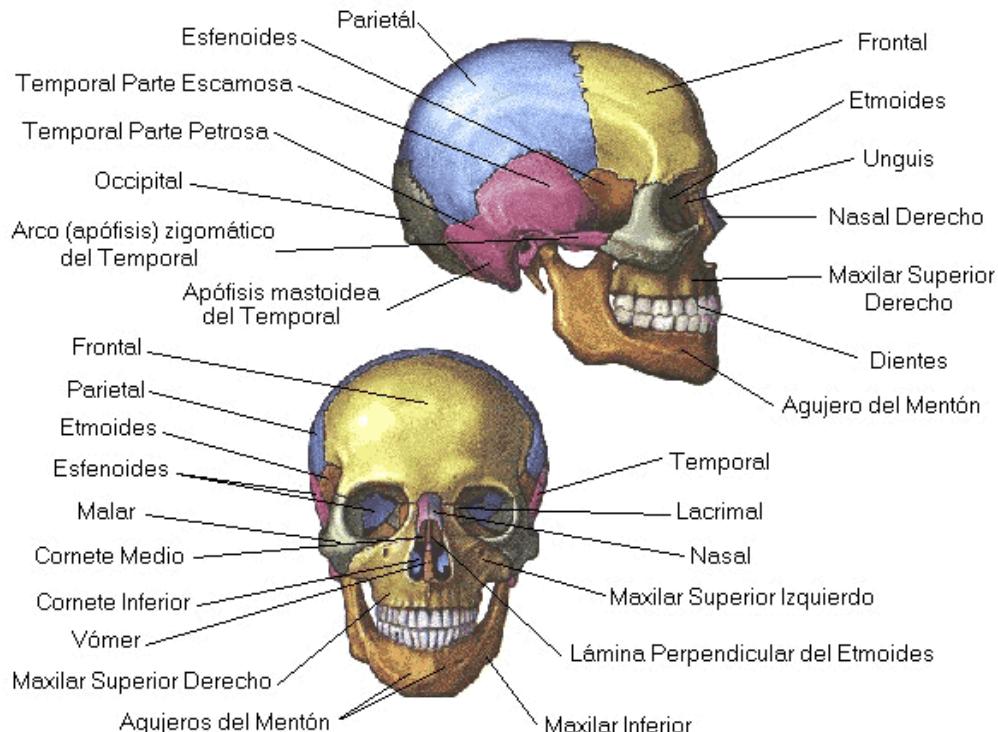


Fig. 2.1: Huesos del cráneo

Aunque se pueden clasificar de una mejor manera en huesos que forman la mandíbula superior que serían todos salvo el que forma la mandíbula inferior que es el maxilar inferior.

Los dos huesos que nos van a interesar para la realización del proyecto son el maxilar superior y la mandíbula o maxilar inferior.

2.1.1 Maxilar Superior

Actúa como eje en todo lo que es la mandíbula superior, es cuadrilátero con un cuerpo hueco que presenta el seno maxilar. En este cuerpo describimos una cara externa, una cara interna y cuatro bordes. El borde inferior se denomina

alveolar tiene unas cavidades que son los alveolos que reciben a las raíces de los dientes, estas raíces marcan unos salientes a nivel de la parte más inferior de la cara externa que se denominan eminencias dentarias de las cuales una destaca más que es la eminencia canina. El borde posterior se denomina eminencia maxilar, el borde superior corresponde al borde orbitario y el borde anterior articula hacia arriba con los huesos propios de la nariz y hacia abajo apreciamos la escotadura nasal y la espina nasal anterior.

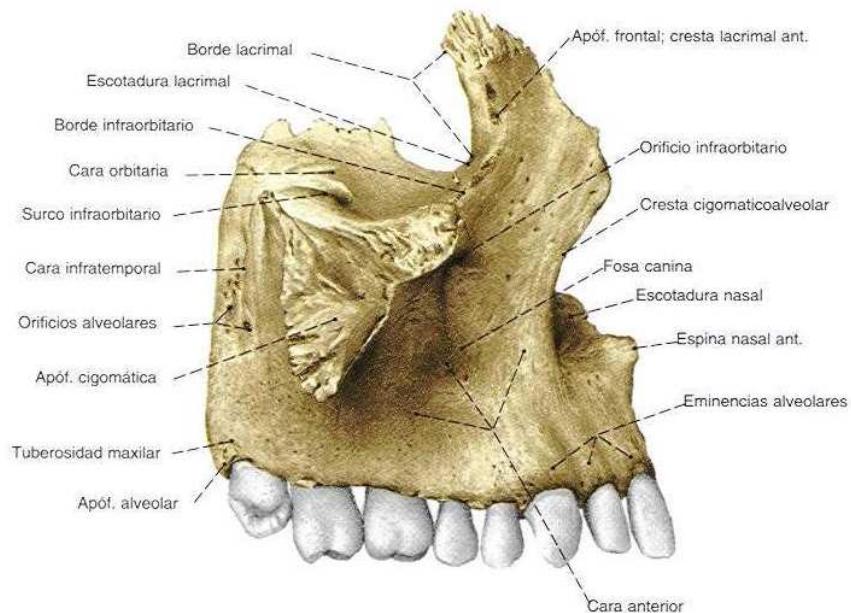


Fig. 2.2: Visión lateral del maxilar superior

2.1.2 Maxilar inferior

Es un hueso que por si solo va a formar la mandíbula inferior que es la parte inferior de la cara. Resulta de la fusión de dos huesos que se unen en la línea media que se denomina sínfisis mentoniana por debajo de la cual encontramos la eminencia

mentoniana. Se pueden diferenciar dos partes, una horizontal y otra vertical, ambas separadas por un ángulo que se denomina gonion, en el cual, externamente se inserta un músculo masticador llamado masetero. Hacia arriba, la porción ascendente termina en dos salientes, hacia delante el apófisis coronoide y hacia atrás el cóndilo del maxilar inferior. En el apófisis coronoide se inserta el músculo temporal, que es otro músculo masticador.

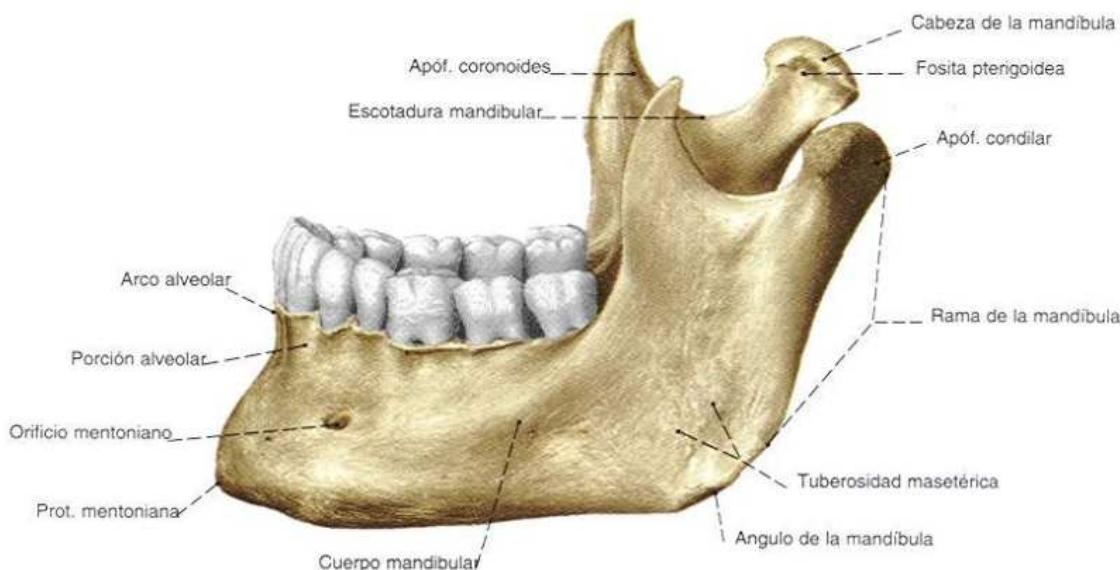


Fig 2.3: Visión lateral y superior de la mandíbula

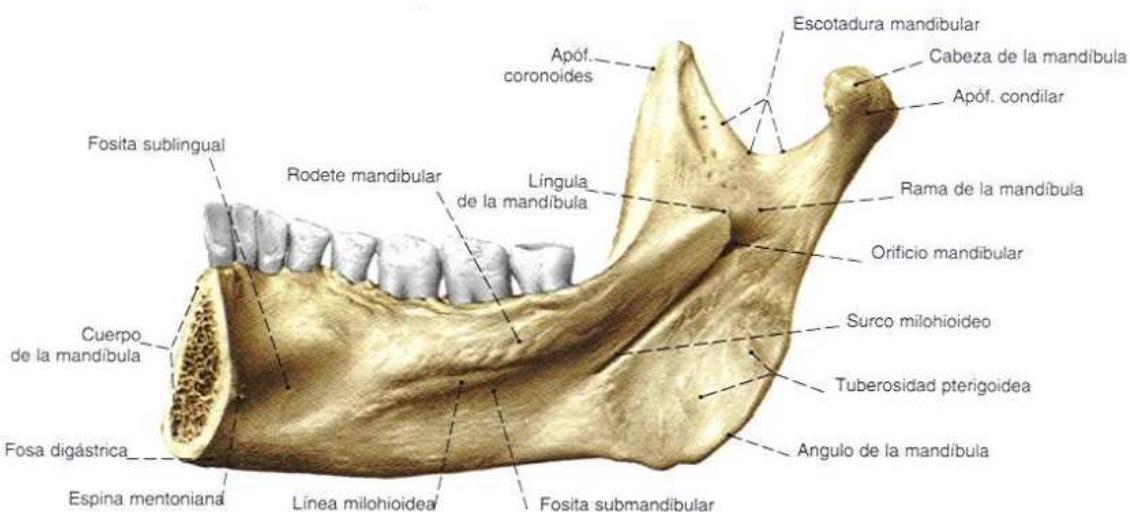


Fig. 2.4: Visión medial de la mitad derecha de la mandíbula

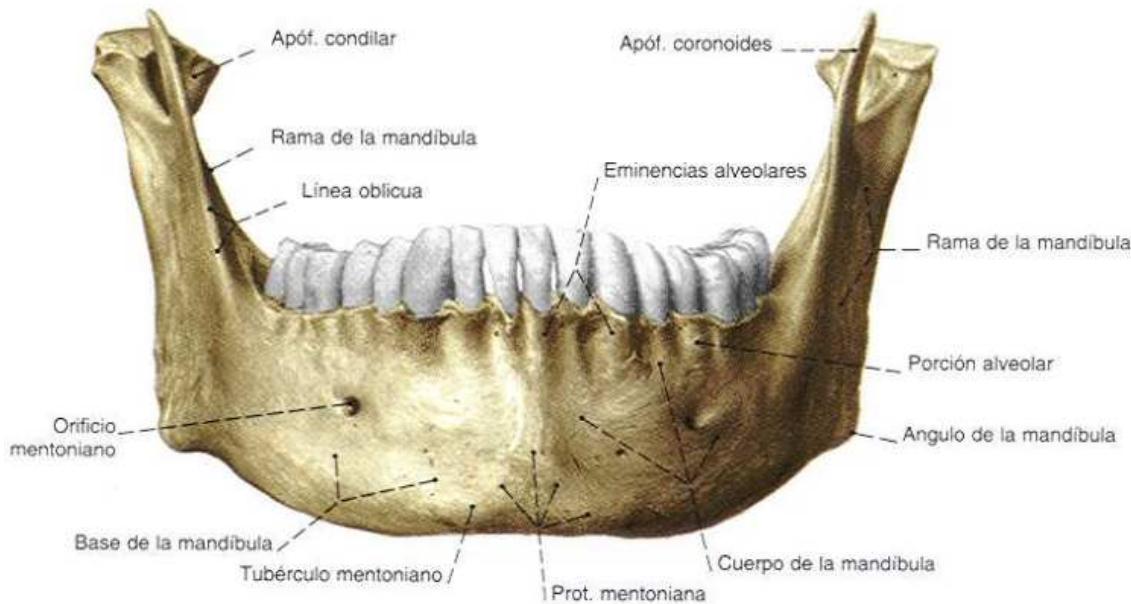


Fig. 2.5: Visión anterior de la mandíbula

2.2 Los dientes (persona adulta)

2.2.1 Partes del diente

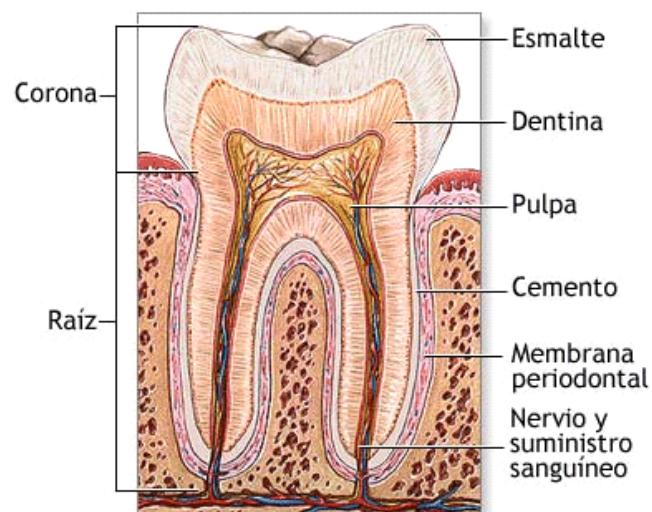


Fig. 2.6: Partes del diente.

Corona del diente – La parte visible del diente en la boca

Esmalte - El esmalte es la capa dura exterior del diente, y es la sustancia más dura del cuerpo.

Dentina - La dentina es la estructura más débil que comprenden la mayor parte del diente. Está llena de diminutos tubos que transmiten señales como estímulos de calor, frío o dolor a la pulpa del diente, donde se encuentran los nervios y los vasos sanguíneos.

Encías - Tejido firme que rodea la raíz de los dientes.

Raíz - El diente es como un iceberg – aunque todo lo que vemos en la boca es la corona, bajo la superficie, empotrada en el hueso de la mandíbula, está la compleja estructura de la raíz.

Pulpa - Un tejido compuesto de vasos sanguíneos y nervios, que alimenta los tejidos dentales duros. A menudo se denomina el nervio dental. Los nervio y vasos sanguíneos de la pulpa están conectados a los sistemas nervioso y circulatorio del cuerpo.

Cemento - La estructura de tipo óseo que cubre la raíz.

Periodoncia - Tejido que mantiene al diente en su sitio.

Mandíbula - El hueso que forma la estructura de la boca y que sujetas los dientes.

2.2.2 Tipos

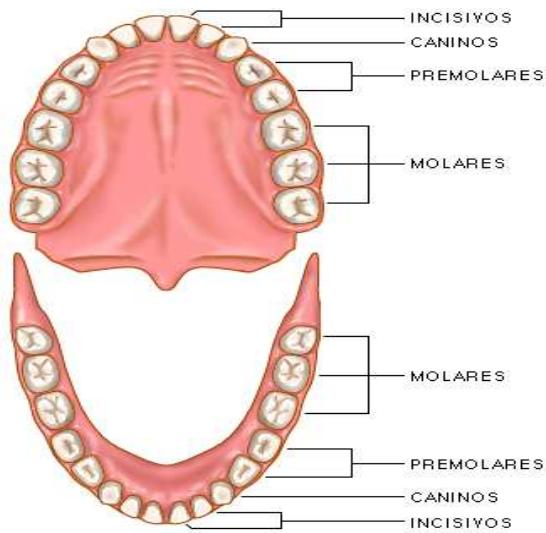


Fig. 2.7: Tipos de dientes

Incisivos - Finos y afilados, empleados para cortar la comida.

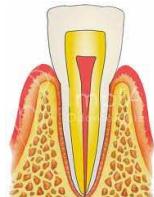


Fig. 2.8: Incisivo vista frontal Fig.2.9: Incisivo vista lateral

Caninos - Afilados y puntiagudos, empleados para sujetar y rasgar la comida.

Premolares - Superficies afiladas y planas para sujetar y machacar la comida.

Molares - Amplios y planos, empleados para masticar la comida.

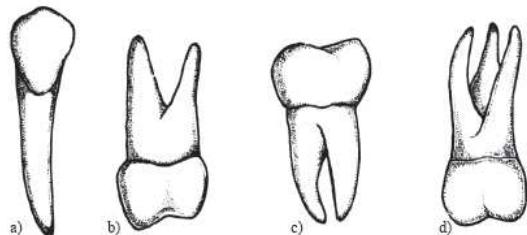


Fig. 2.10: a) Canino. b) Premolar superior.

c) Molar inferior. d) Molar superior

2.3 Músculos Masticadores

Masetero: Tiene forma rectangular, está formado por 2 raíces musculares principales llamadas superficial y profundo. Su función principal es la elevación del maxilar inferior, aunque puede colaborar en la protrusión simple por medio de su haz superficial y hacia atrás por el profundo. Juega un papel importante en el cierre cuando es protruido simultáneamente, toma parte también en los movimientos laterales externos del maxilar, se considera que actúa proporcionando fuerza para la masticación.

Temporal: Es un músculo de la masticación, se encuentra en la fosa del temporal, de la que tiene la forma y las dimensiones. Tiene por función elevar la mandíbula y también dirigirla hacia atrás; ésta última acción la realizan sus haces posteriores.

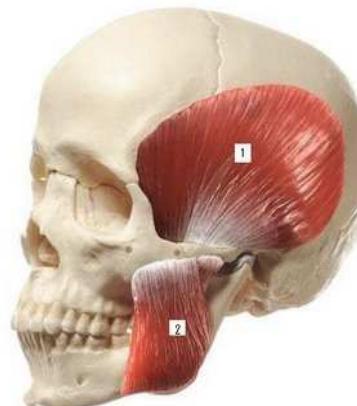


Fig. 2.11: (1)Músculo temporal. (2)Músculo masetero

2.4 Biomecánica de la mandíbula

El movimiento mandibular se lleva a cabo mediante una compleja serie de actividades de rotación y translación tridimensionales interrelacionadas. Lo determinan las acciones combinadas y simultáneas de las dos articulaciones temporomandibulares. Veamos los distintos movimientos que se realizan en la ATM (articulación temporomandibular):

- **Movimientos de Ascenso y Descenso:**
 - **Descenso:** De la relación céntrica el descenso mandibular se inicia por acción de los músculos suprahioideos. Para que esto suceda deben tomar punto fijo en el hueso hioideo, el que es estabilizado por la contracción isométrica de los músculos infrahioideos, y con los elevadores inactivos. Por la inserción mandibular de los músculos suprahioideos, ubicados más anterior en relación al hioideo, permiten el descenso mandibular solamente en base a rotación del

cóndilo mandibular en el comportamiento inframeniscal, considerando un eje que pasa por ambos cóndilos. Este movimiento permite un rango de apertura de entre 20 y 25 mm y se conoce como 1º tiempo de la apertura. El 2º tiempo del descenso produce el compartimiento suprameniscal, correspondiendo a la translación del cóndilo mandibular en conjunto con el disco articular por la unión que existe entre ambos por la presencia de los ligamentos discales. El desplazamiento tiene una dirección hacia adelante y abajo en relación a la vertiente posterior de la eminencia articular del temporal. El desplazamiento anterior del disco articular se ve limitado por la distensión de las fibras cortas del ligamento posterior o freno meniscal posterior. Esta 2ª fase está a cargo de la contracción bilateral de los pterigoideos laterales, principalmente su fascículo inferior o pterigoideo. Permite una apertura máxima de 45mm.

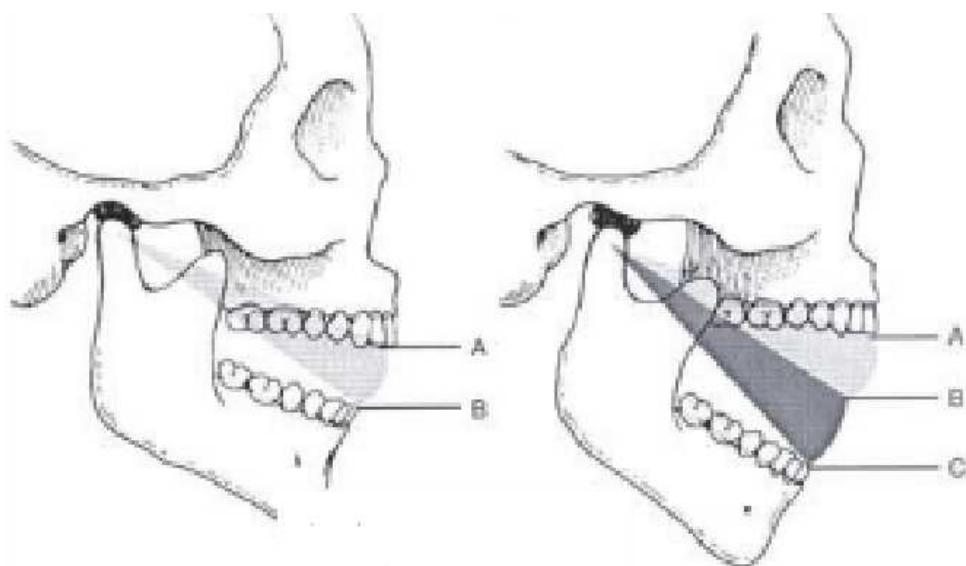


Fig. 2.12: 1ª Fase del descenso

Fig. 2.13: 2ª Fase del descenso

- **Ascenso:** termina la actividad de los depresores, la mandíbula comienza su recorrido inverso, también en dos tiempos: en el primero se produce la translación hacia arriba y atrás en el comportamiento suprameniscal, cóndilos y meniscos son arrastrados en forma conjunta por la contracción bilateral de las fibras horizontales y oblicuas de los músculos temporales, maseteros y pterigoideos mediales; y luego la rotación en el inframeniscal, a cargo de los maseteros, pterigoideos internos y fibras verticales de los temporales.

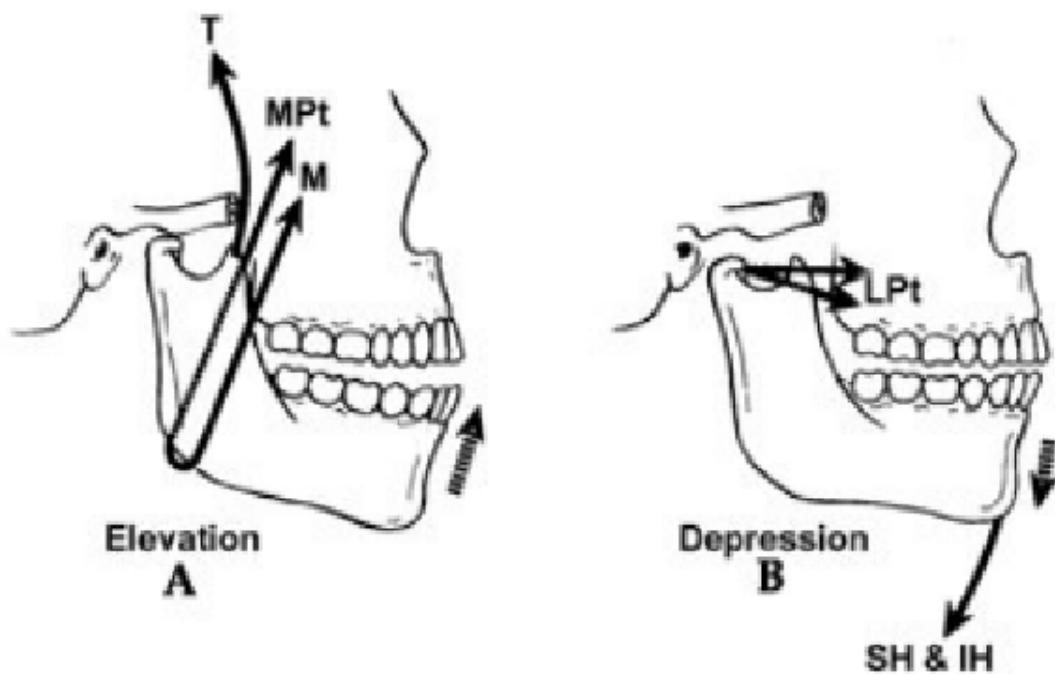


Fig. 2.13: Fase de ascenso

- **Movimientos de Propulsión y Retropulsión:**

- **Propulsión:** La mandíbula debe proyectarse anteriormente y para ello debe vencer las interferencias que implican los planos inclinados de los incisivos, cúspides de molares y vertiente posterior de la eminencia articular del temporal, para lo cual se inicia con un movimiento de descenso. Para esto se produce una actividad mínima de los músculos genihoideos controlada por el tono de los elevadores. El desplazamiento anterior está a cargo de la contracción bilateral de los pterigoideos laterales, El movimiento en realidad es un descenso propulsado. El rango de movimiento normal es de 10mm.
- **Retropulsión:** retorno de la mandíbula atrás y arriba. Como nuevamente se debe vencer el engranamiento dentario, nuevamente hay leve actividad de los depresores y se realiza por acción de las fibras horizontales o posteriores del músculo temporal que son netamente retropulsoras. Así retornan cóndilos y meniscos a la fosa mandibular.

- **Movimientos de Retrusión y Protusión:**

- **Retrusión:** a partir de la relación céntrica fisiológica, la mandíbula es desplazada hacia atrás por las fibras horizontales del temporal, hasta efectuar la compresión de los tejidos reotroarticulares. La amplitud del movimiento es mínima. Para vencer el engranaje dentario es necesario un mínimo desplazamiento hacia

abajo y atrás. Este tipo de desplazamiento no es fisiológico, pero tiene importancia en aplicación clínica para lograr mediante manipulación mandibular posiciones condilares estables, estandarizables, reproducibles y repetibles las veces que sea necesario.

- **Protrusión:** causado por el cese de la actividad muscular que provocó la retrusión y por la resiliencia de los tejidos retroarticulares.

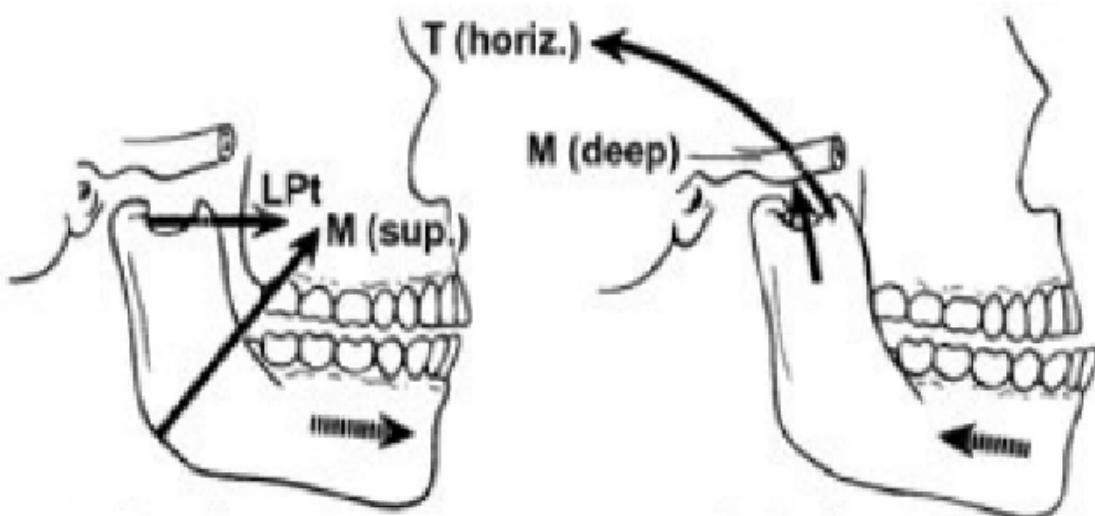


Fig. 2.14: Protrusión

Fig. 2.15: Retrusión

- **Movimientos de Intrusión y Extrusión:**

- **Intrusión:** la posición de oclusión céntrica implica la existencia de la una leve actividad de los músculos elevadores. Cuando esta contracción aumenta el diente sufre la

introducción dentro del alvéolo, permitido por la elasticidad del ligamento periodontal. Este movimiento es muy limitado, dependiente del espesor del ligamento periodontal y se traduce en una ligera compresión de la ATM, del cóndilo sobre el menisco.

- **Extrusión:** por la capacidad del periodonto de recobrar su forma y dimensión inicial, es el retorno del diente a su posición sin interrupción del contacto dentario. Esto luego del cese de la actividad de los músculos elevadores.

- **Movimientos de Lateralidad**

- **Lateralidad Centrífuga:** es un movimiento asimétrico porque la actividad muscular y el desplazamiento condilar es diferente a ambos lados de la línea media. El punto mentoniano se desplaza a uno de los lados, abandonando el plano sagital. El cóndilo del lado hacia donde se produce el desplazamiento se denomina Cón dilo del LADO DE TRABAJO, mientras que el opuesto es el LADO DE BALANCE. El cóndilo del lado de balance es traccionado hacia la línea media por la contracción del pterigoideo lateral (contracción unilateral) describiendo junto con el menisco una trayectoria hacia abajo adelante y adentro. El cóndilo del lado de trabajo sufre un pequeño desplazamiento atrás y afuera a causa de la tracción de las fibras horizontales del temporal. Actúan

también los maseteros y pterigoideos internos para mantener el contacto dentario. El rango de movimiento es de 10mm.

- **Lateralidad Centrípeta:** cuando termina la actividad muscular y es reforzado por la contracción de las fibras horizontales del temporal, con retorno a la línea media del mentón.
- **Diducción:** concepto que implica movimientos de lateralidad alternados y repetidos.

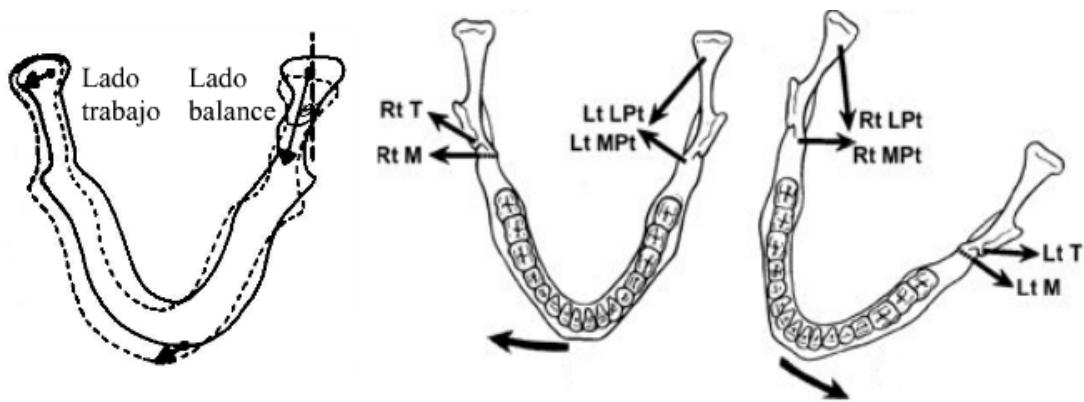


Fig. 2.16: Movimientos de lateralidad.

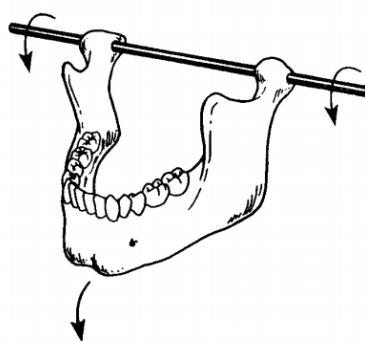


Fig. 2.17: Movimiento de rotación alrededor de un eje horizontal

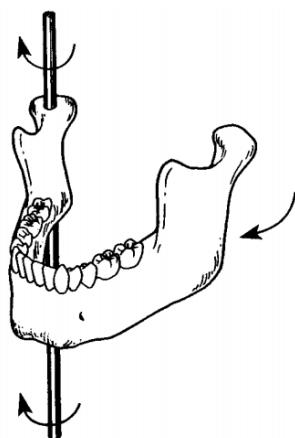


Fig. 2.18: Movimiento de rotación alrededor de un eje frontal

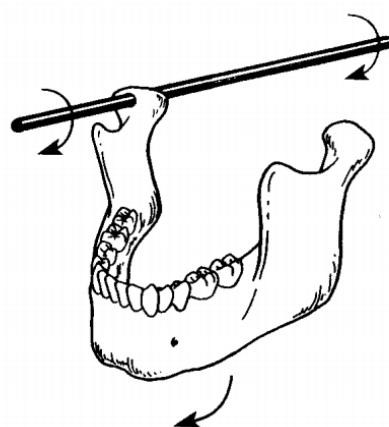


Fig. 2.19: Movimiento de rotación alrededor del eje sagital

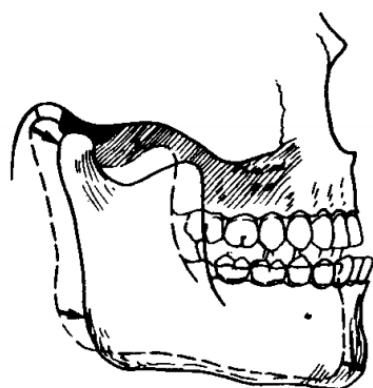


Fig. 2.20: Movimiento de translación de la mandíbula

3. Generación de los modelos de elementos finitos

En este capítulo se describirá la creación de los modelos de elementos finitos utilizados en la realización de este proyecto y del material empleado en cada uno de los diferentes elementos, así como las condiciones de contorno tanto para la validación de modelo como para el análisis de la simulación del movimiento de masticación que realiza la mandíbula.

3.1 Generación del modelo sólido de dientes, hueso y ligamentos

El primer paso para la realización del proyecto, fue la obtención del modelo en 3D de la estructura del cráneo completo.

Para la generación del modelo sólido, se utilizó MIMICS, un programa de segmentación que permite la obtención en 3D partiendo de tomografías axiales computerizadas (TACs). El TAC obtenido para la realización de su estudio pertenece a una mujer adulta.

Este programa separa los volúmenes según una escala de grises que van relacionados en función de la densidad de los tejidos. Dicha escala irá desde el blanco (donde solamente se apreciarán los dientes al poseer el material más denso) hasta el negro puro (el aire). En el umbral intermedio obtendremos el hueso y los ligamentos.

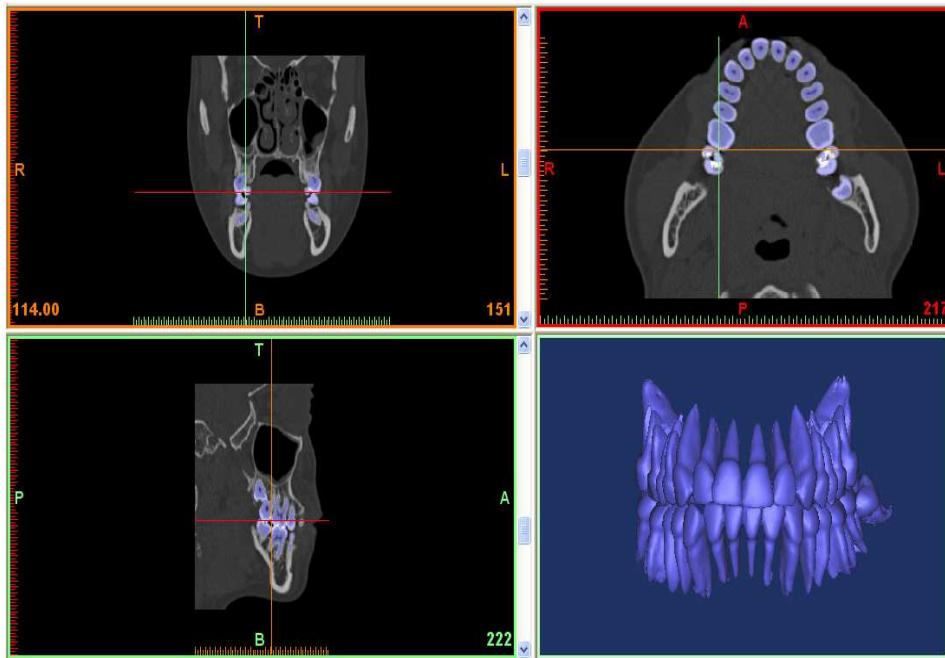


Fig. 3.1: Obtención en 3D de los dientes

MIMICS nos permite la opción de realizar una serie de operaciones (BOOLEAN OPERATIONS) en las que podemos obtener las distintas partes deseadas que serían: los dientes, el cráneo y los ligamentos que sujetan a los dientes.

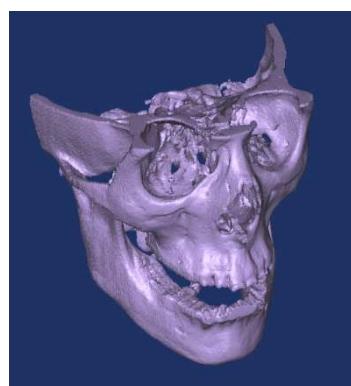


Fig.3.2: Solo Hueso (sin dientes)

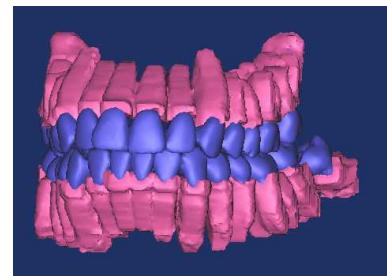


Fig.3.3: Dientes con ligamentos

Una vez obtenidos los elementos deseados, se exportó un archivo STL para poder realizar la malla de elementos finitos.

3.2 Modelo de EF de dientes, hueso y ligamentos.

Para poder realizar el mallado de los distintos elemento se usó el programa Harpoon en donde obtuvimos distintos tipos de mallas debido a la complejidad de las estructuras. Dichas mallas fueron basadas en elementos tridimensionales de 8 (C3D8), 6(C3D6) y 4 nodos (C3D4). Los elementos C3D4 son tetraedros de 4 nodos, los C3D6 son prismas triangulares de 6 nodos y los elementos C3D8 son cubos de 8 nodos. Aunque habría sido aconsejable la construcción de mallas de EF a partir de sólo hexaedros, como ya hemos dicho anteriormente la complejidad de los distintos elementos que forman este trabajo, no fue posible.

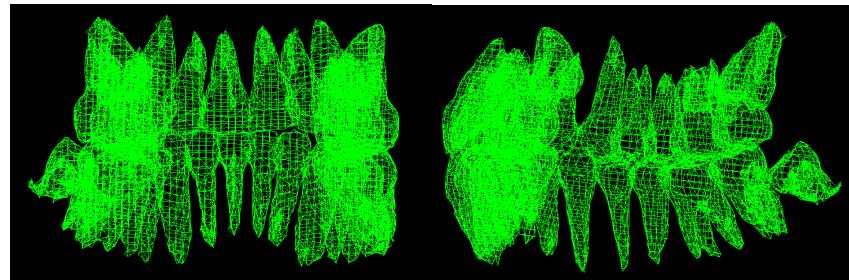


Fig.3.4: Vista frontal y ladeada del modelo en 3D de los dientes mallados en el programa Harpoon

Una vez mallados los dientes, ligamentos y hueso, se exportó a I-DEAS 11 donde se definieron como tres grupos y se juntaron en un mismo modelo manteniendo cada uno sus características. Se borraron partes del modelo inicial que no intervendrían en el estudio debido a que el software no podía hacer el cálculo completo.

También se introdujeron en el modelo una serie de haces fibras que serían los músculos maseteros y temporales.

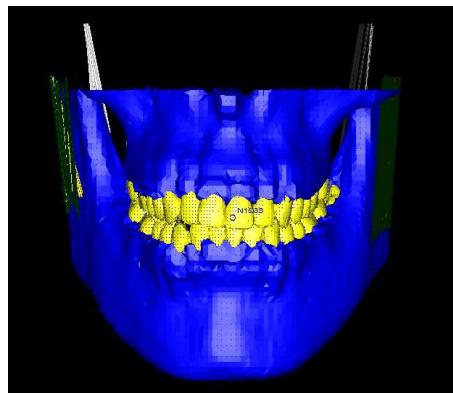


Fig.3.5: Vista frontal

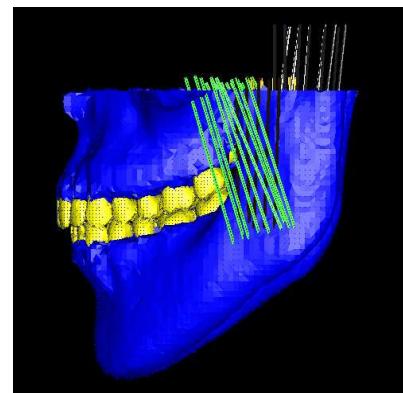


Fig.3.6: Vista lateral

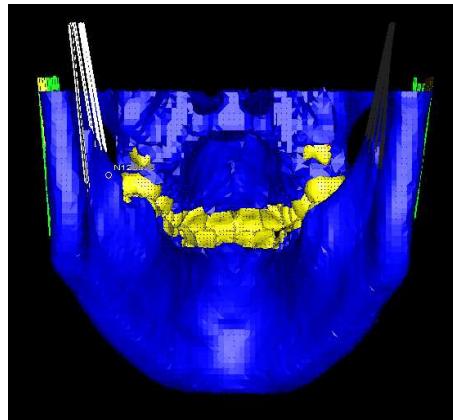


Fig.3.7: Vista posterior

Una vez obtenido el modelo se procedió a la exportación a Abaqus para la realización de los cálculos.

Antes de la realización de los cálculos tiene que estar bien completada la introducción de los datos: condiciones de contorno, cargas, desplazamientos, etc.

Durante la simulación se crean una serie de archivos de salida. Éstos tienen como objetivo mostrar a través de visualizaciones, o por medio de archivos de texto, los

resultados del modelo a analizar, así como los posibles errores originados durante un análisis.

Estos archivos son:

- **“Status File” (.sta):** Este archivo contiene información acerca del progreso del análisis.
- **“Data File” (.dat):** Este archivo contiene información acerca de la definición del modelo, la historia aplicada y cualquier error que sea detectado durante el análisis.
- **“Message File” (.msg):** Este archivo informa de los errores que se producen durante la simulación.
- **“Output” (.odb):** Este archivo es usado para recopilar información del modelo y los resultados del análisis. El módulo de visualización de Abaqus CAE usa este archivo para la visualización de los resultados.

3.3 Material

Los materiales en el modelado de la mandíbula son los siguientes:

- Maxilar superior y maxilar inferior: Hueso cortical
- Dientes: Dentina
- Ligamentos: Ligamentos periodontal

Tras revisar varias bibliografías para la decisión de las propiedades mecánicas de dichos materiales, se llegó a la conclusión de utilizar la siguiente tabla de valores:

MATERIAL	MODULO DE YOUNG [MPa]	RELACIÓN DE POISSON
Dentina	18980	0.31
Ligamento Periodontal	0.0703	0.45
Hueso Cortical	10240	0.30

3.4 Condiciones de contorno

Como ya hemos hablado anteriormente de la complejidad de este proyecto, no se pudo realizar su estudio con todo el cráneo. Se tuvo que reducir el modelo hasta el visto en la Fig.3.5.

El estudio va a consistir en cómo queda afectado todo el modelo debido a distintas casos en los que el individuo pudiera hacer uso de los músculos masticadores (temporales

y maseteros), ya que podrían estar afectados por cualquier motivo como puede ser una lesión traumática, parálisis neurológica, etc.

Para ello fijaremos la parte superior del maxilar superior, ver Fig.3.8, ya que éste, permanece inmóvil ante la acción de masticar, mientras que es el maxilar inferior, que por la acción de los músculos masticadores realiza todos los movimientos que ya hemos visto anteriormente.

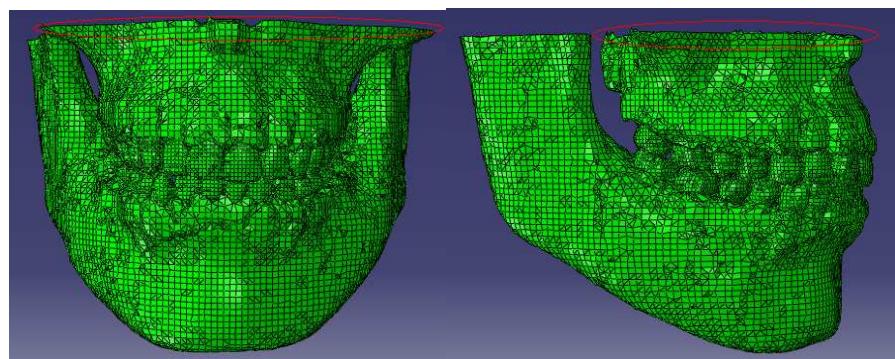


Fig.3.8: Vista frontal y lateral de la parte fijada del modelo.

Para los distintos casos a estudiar serán los músculos los que realizarán la acción.

4. Resultados

4.1 Acción de los músculos maseteros y temporales

4.1.1 Maseteros y temporales

Para la simulación de este caso activamos la acción de que trabajen los músculos tanto maseteros como temporales de ambos lados.

Se puede observar en la figura 4.1 que los desplazamientos que se producen son simétricos y que no sufre una variación significativa con el modelo inicial.

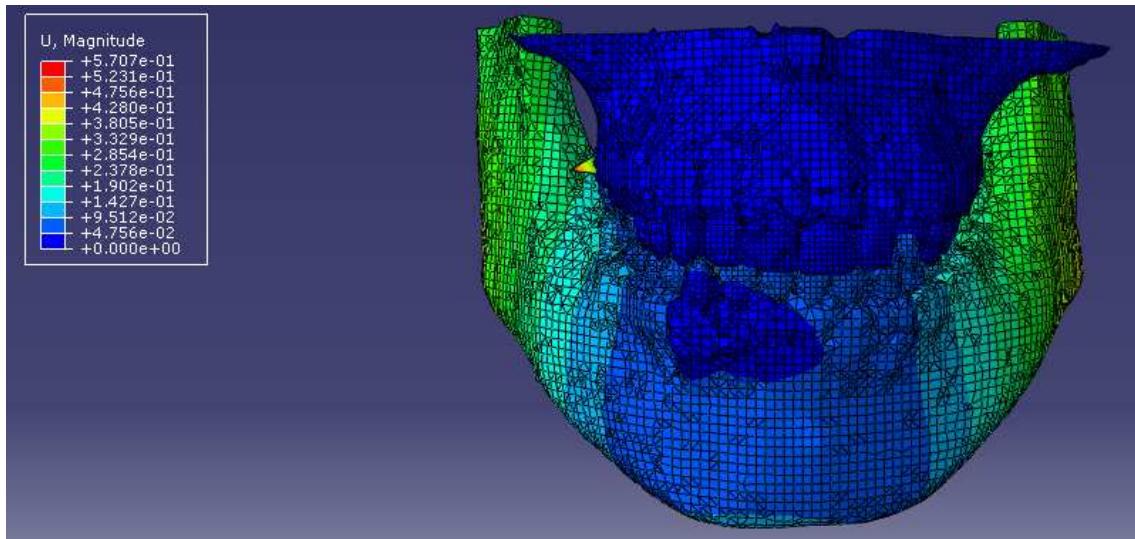


Fig. 4.1: Tabla con desplazamientos y su imagen correspondiente.

En la Fig. 4.2 se muestran las tensiones de Von Mises sufridas en todo el modelo, tampoco se aprecia apenas ninguna zona a tener en cuenta salvo en los molares de ambos lados, como puede apreciarse en la Fig. 4.3, que son los que sufren las máximas tensiones.

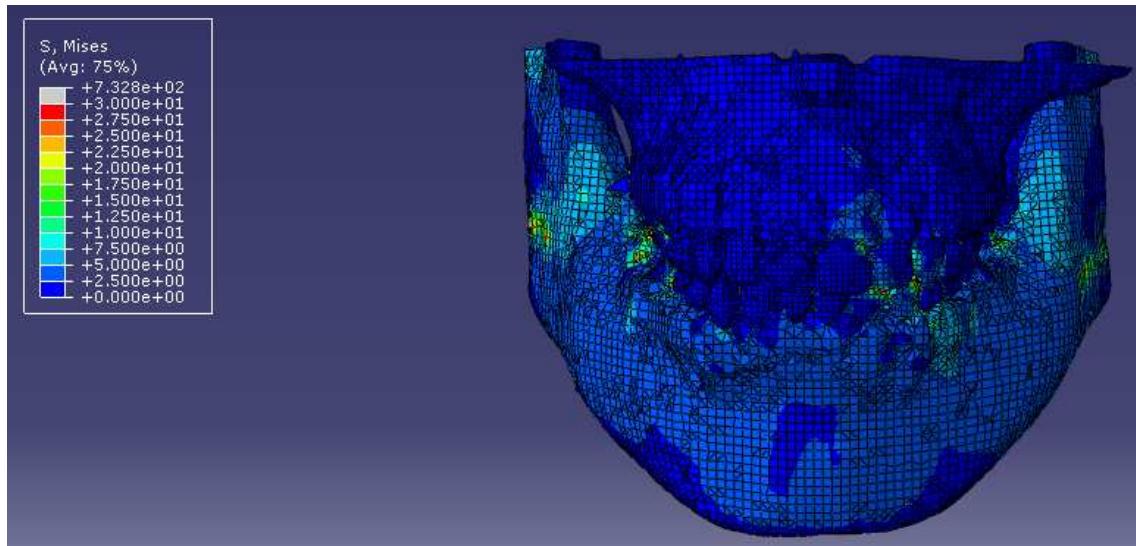


Fig. 4.2: Tabla de tensiones de Von Mises y su imagen correspondiente.

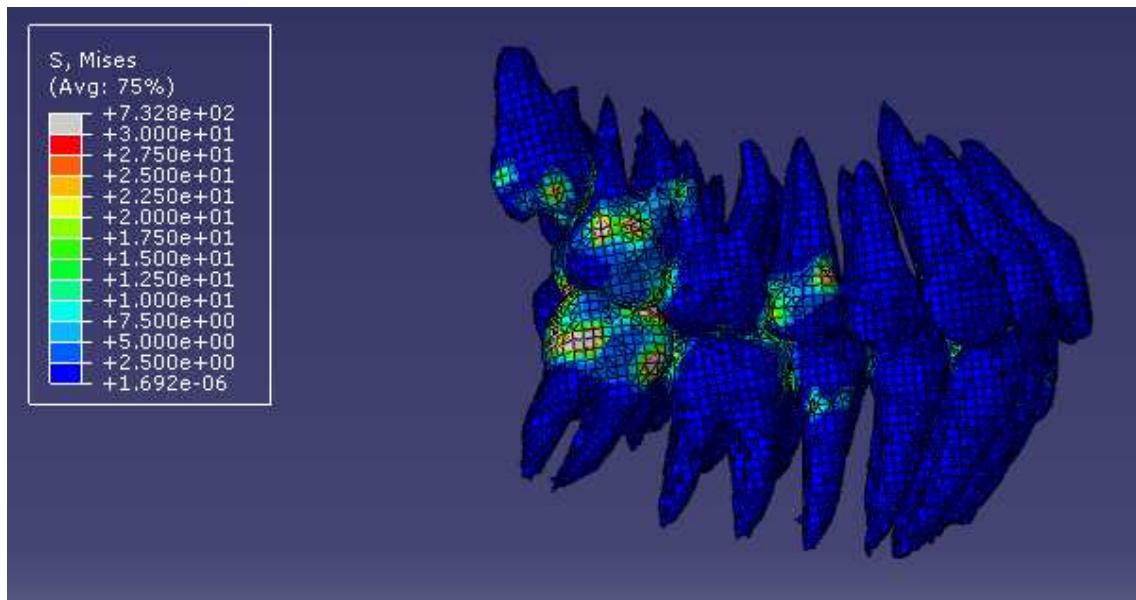


Fig. 4.3: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

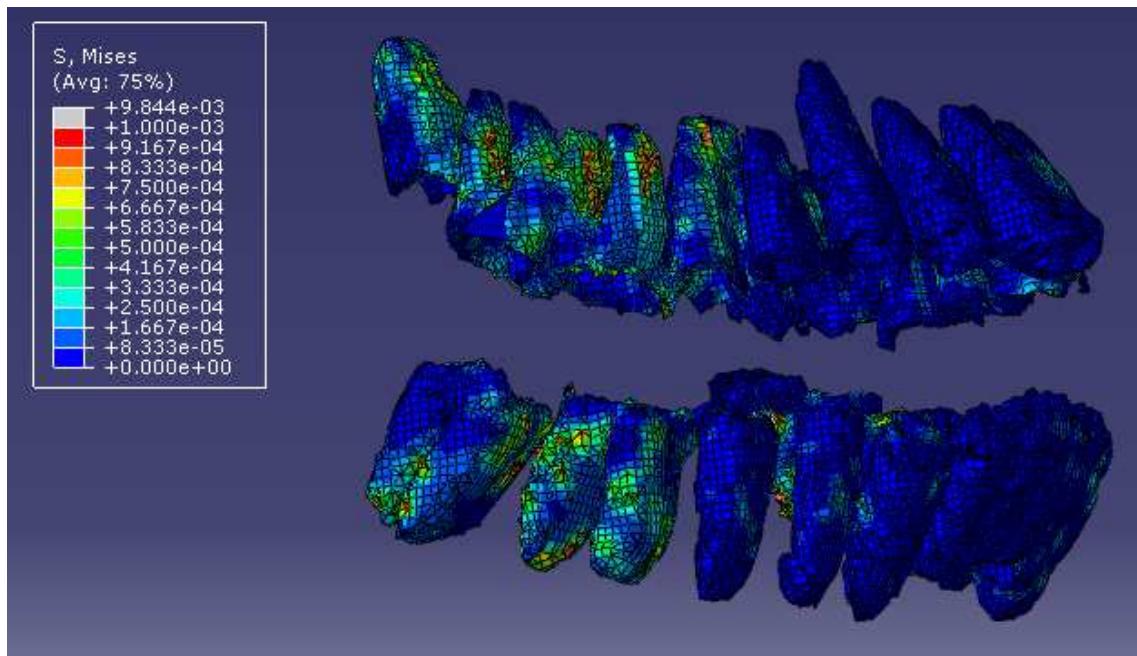


Fig. 4.4: Tabla de Von Mises (ligamentos)

4.1.2 Masetero y temporal derecho

En este caso solamente activaremos los músculos temporal y masetero de la parte derecha.

En la Fig. 4.5 se puede apreciar que ya no existe una simetría, existe un mayor desplazamiento en donde están actuando los músculos y lógicamente, los desplazamientos de la zona izquierda son prácticamente cero.

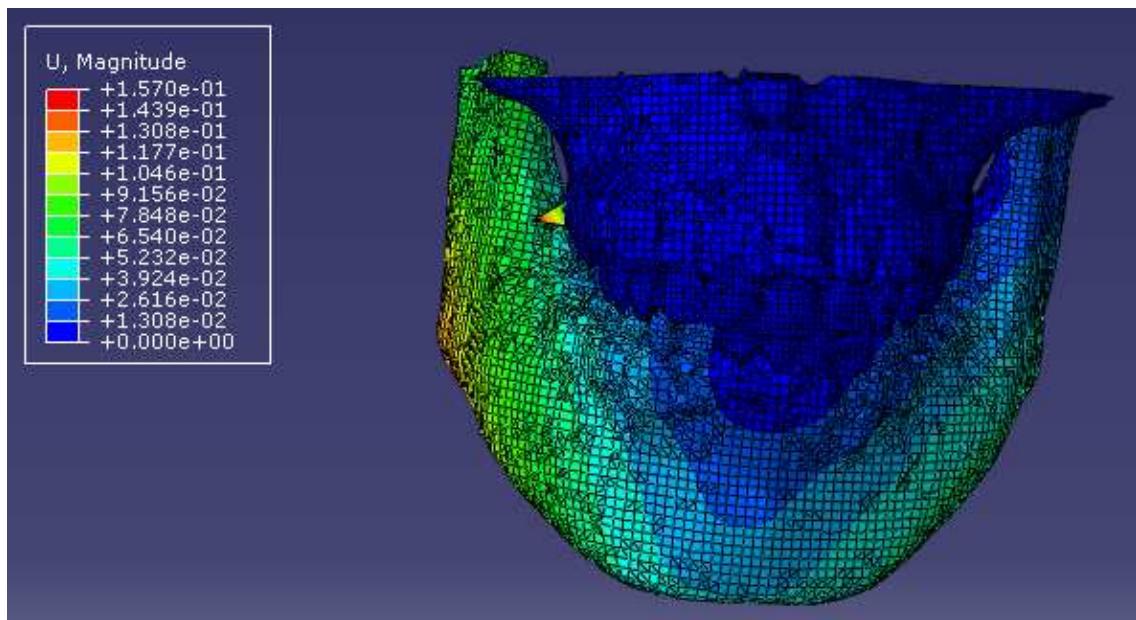


Fig 4.5: Tabla de desplazamientos y su imagen correspondiente.

En la Fig. 4.6 vemos como las tensiones de Von Mises más significativas se producen en la zona donde trabajan los músculos, siendo las tensiones de la otra zona prácticamente cero. En la Fig. 4.7 apreciamos de mejor forma cómo reaccionan los dientes en este caso.

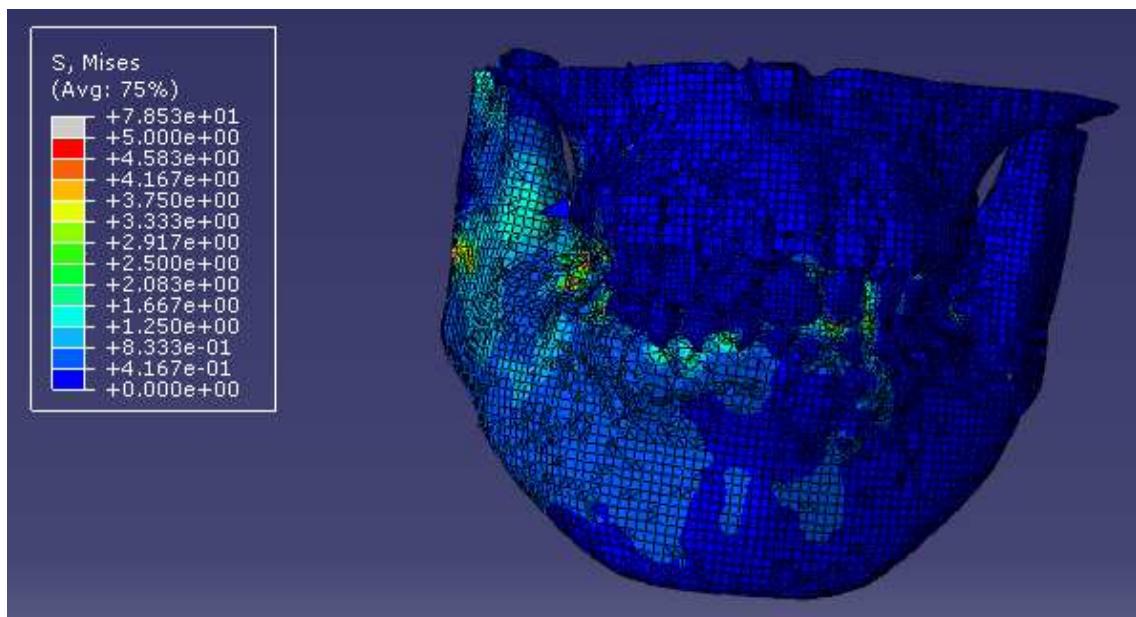


Fig. 4.6: Tabla con las tensiones de Von Mises y su imagen correspondiente.

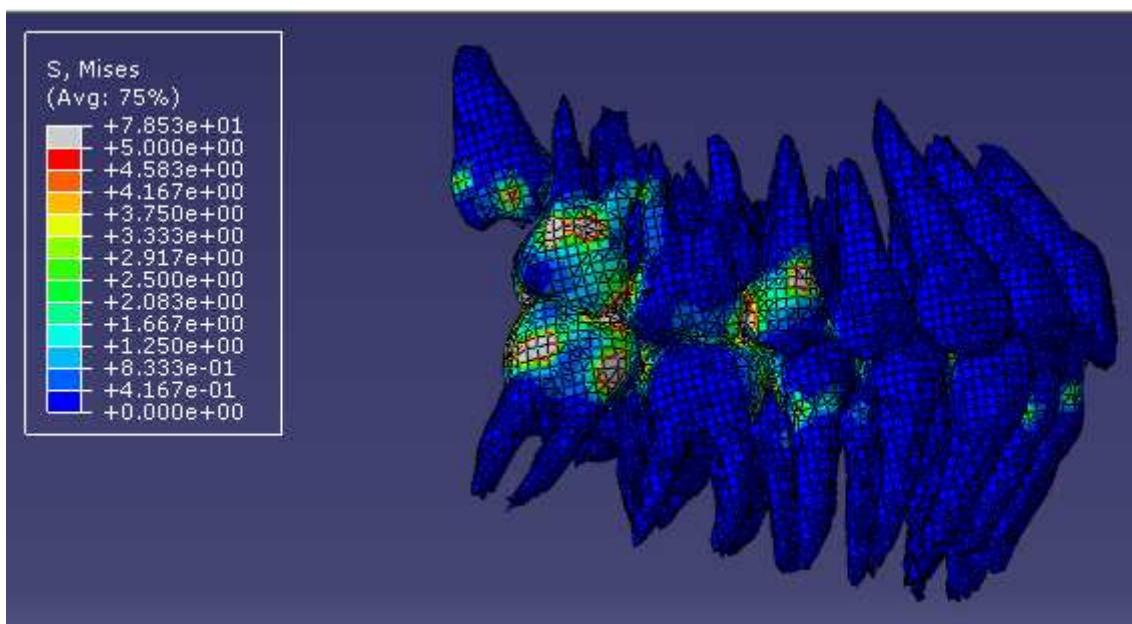


Fig. 4.7: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

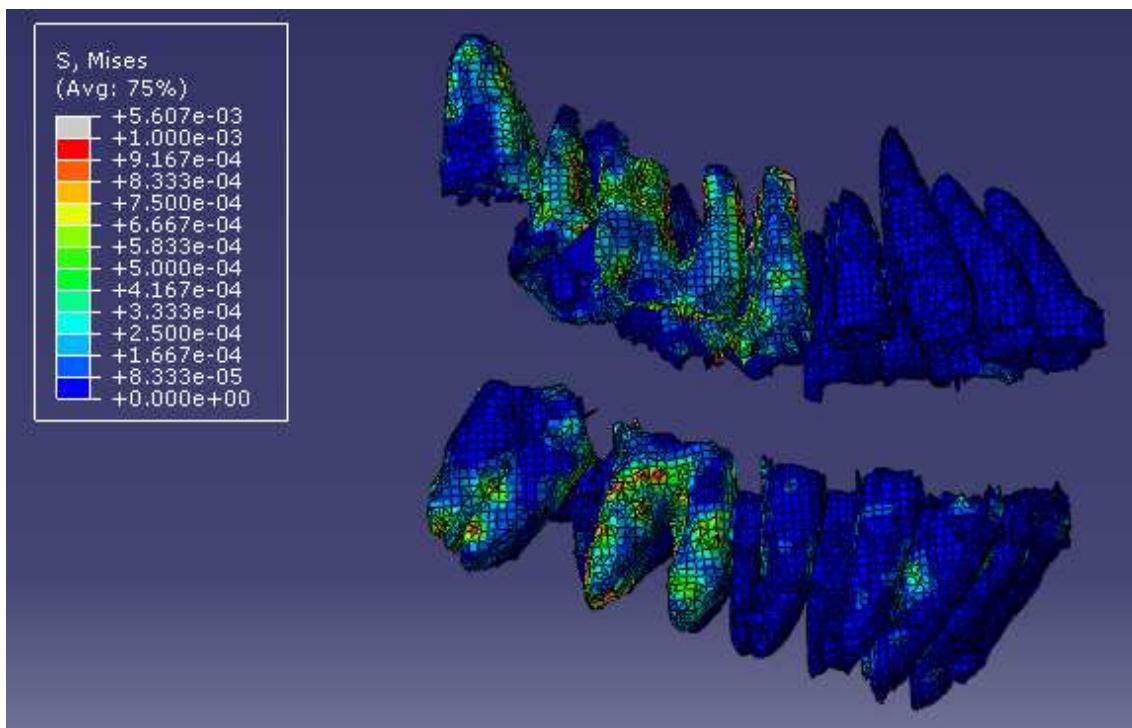


Fig. 4.8: Tabla de Von Mises (ligamentos)

4.1.3 Masetero y temporal izquierdo

Al igual que el caso anterior, solamente actúan los músculos masetero y temporal pero ahora los que se encuentran en la zona izquierda de la mandíbula.

Los resultados son prácticamente iguales que en el caso anterior, donde ya no existe simetría y siendo ahora la zona izquierda la más afectada.

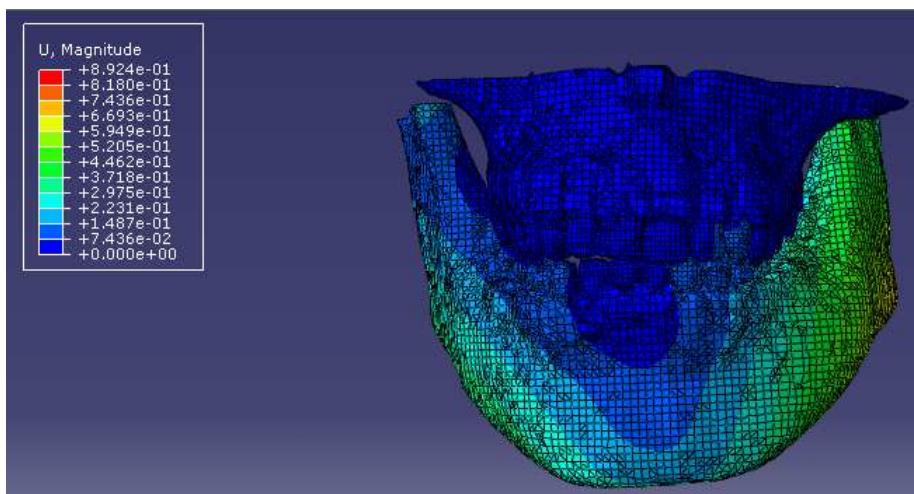


Fig 4.9: Tabla de desplazamientos y su imagen correspondiente.

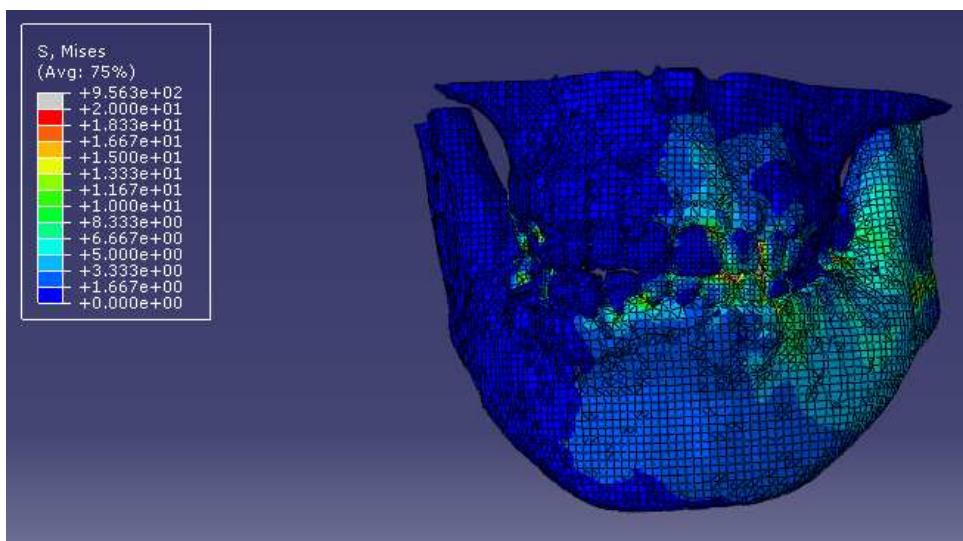


Fig. 4.10: Tabla con las tensiones de Von Mises y su imagen correspondiente.

En la Fig. 4.11 apreciamos unas tensiones algo distintas que en el caso anterior, siendo no solo los molares los que sufren las máximas tensiones sino que también los caninos y los premolares están soportando unas tensiones significativas. Es lógico ya que al no realizar la mandíbula un movimiento “recto hacia arriba” sino que lo hace ladeado dichos dientes entran en contacto.

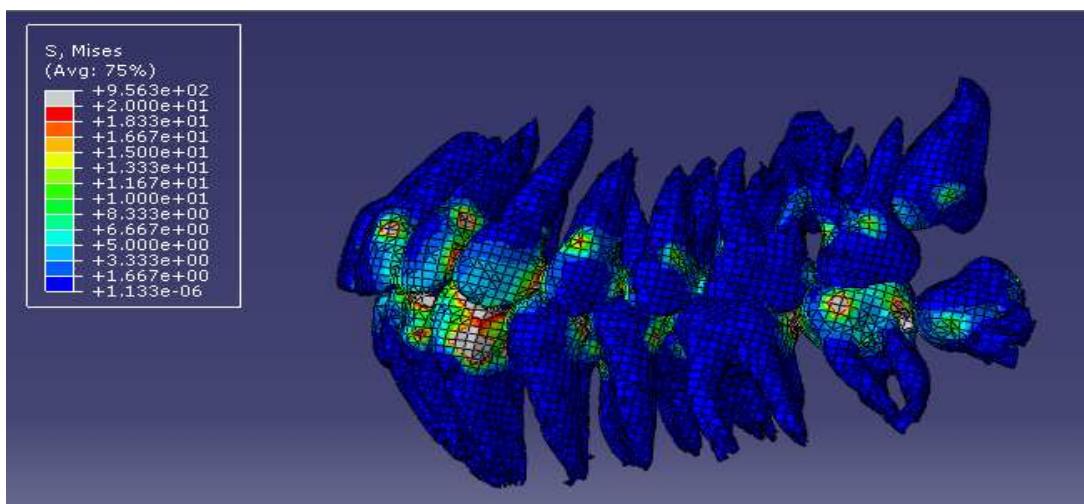


Fig. 4.11: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

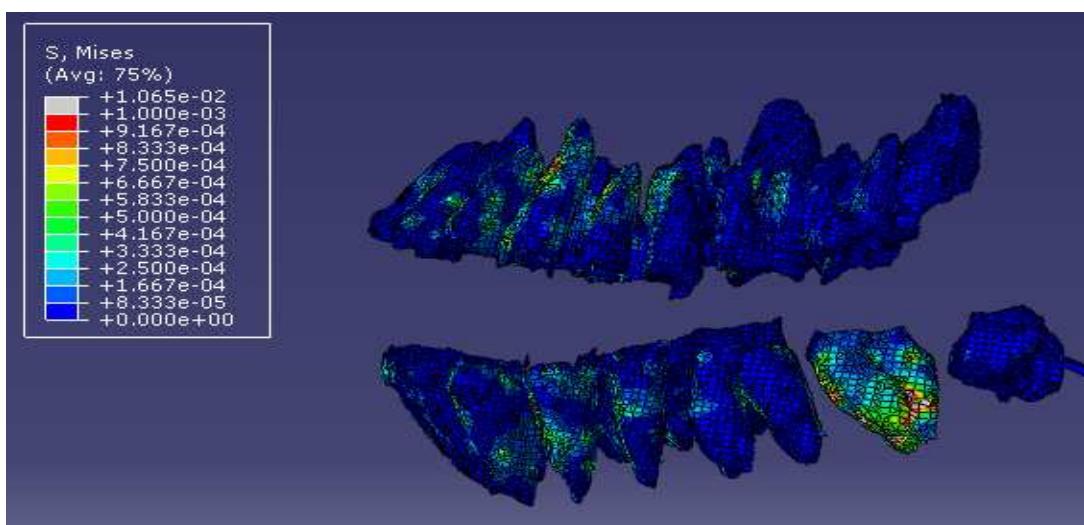


Fig. 4.12: Tabla de Von Mises (ligamentos)

4.2 Acción solamente de los temporales

4.2.1 Los dos temporales

Cuando solamente actúan los temporales de ambos lados se aprecia una diferencia significativa en relación de cuando estaban actuando maseteros y temporales, donde los desplazamientos antes llevaban una dirección transversal a la mandíbula mientras que en este caso los desplazamientos llevan una dirección longitudinal simétrica. Dichos desplazamientos los podemos ver en la Fig. 4.13.

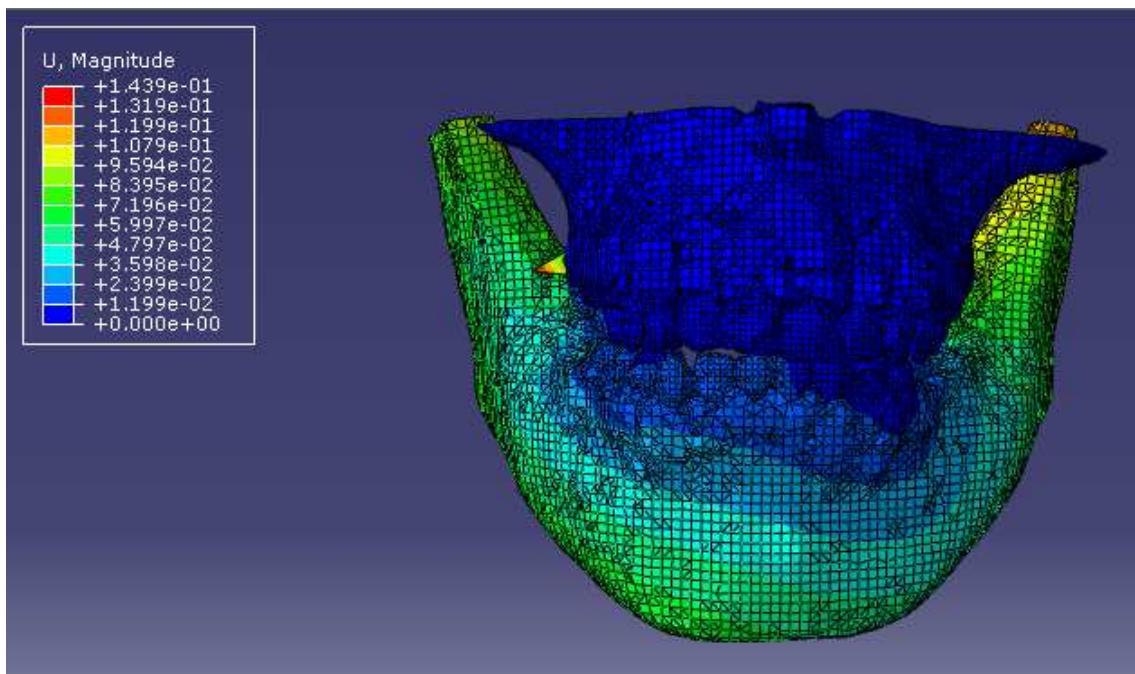


Fig. 4.13: Tabla de desplazamientos y su imagen correspondiente.

Las tensiones de Von Mises serán menores que en los casos anteriores debido a que solamente ejerce la acción un músculo. Fig. 4.14. Serán los molares y premolares los que soporten esas máximas. Fig. 4.15.

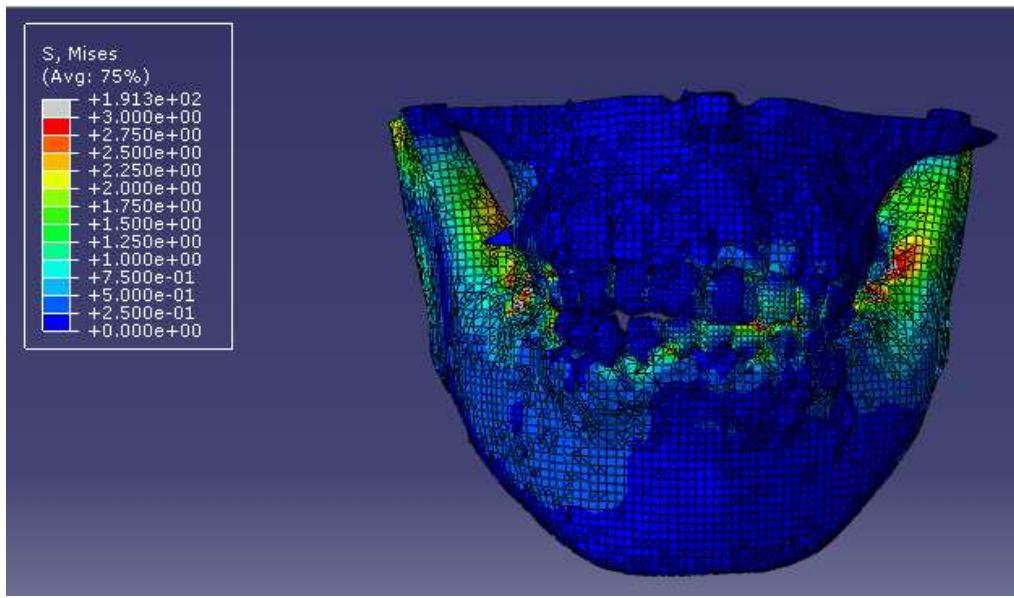


Fig. 4.14: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

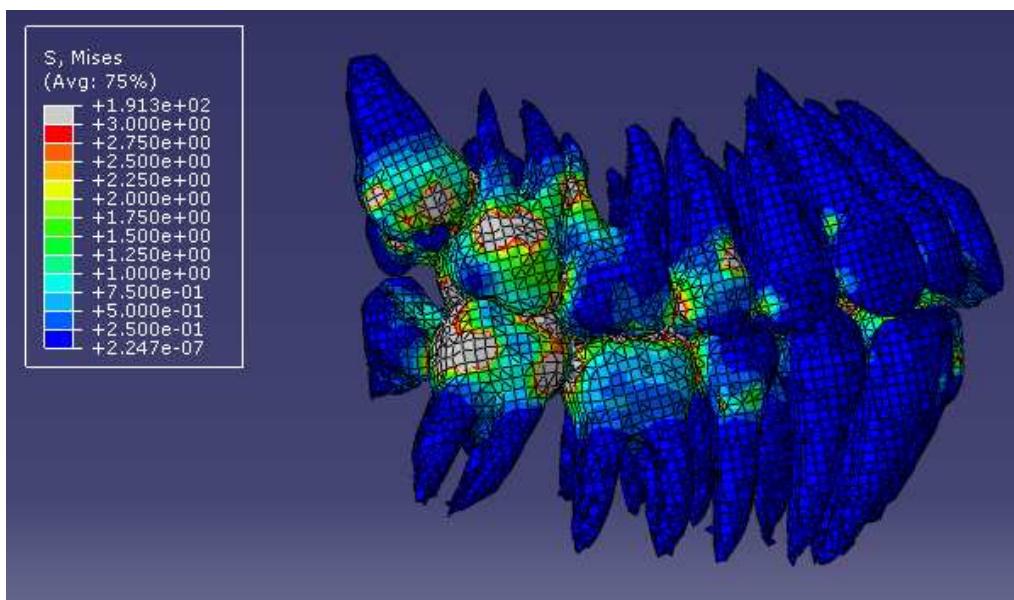


Fig. 4.15: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

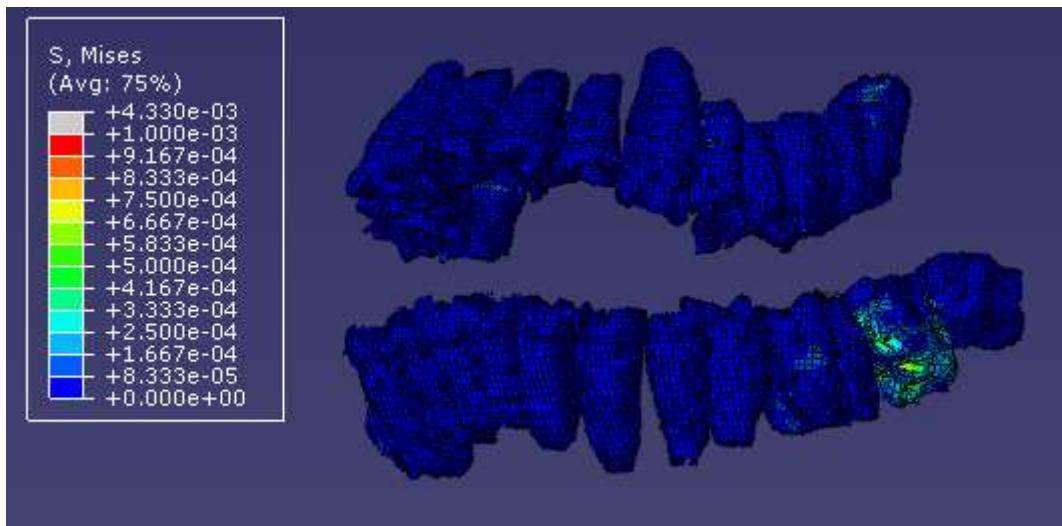


Fig. 4.16: Tabla de Von Mises (ligamentos)

4.2.2 Solo temporal derecho

Se aprecia que ya no existe simetría, Fig. 4.17 y lógicamente los mayores desplazamientos se encuentran en la zona derecha, siendo los de la parte izquierda prácticamente cero.

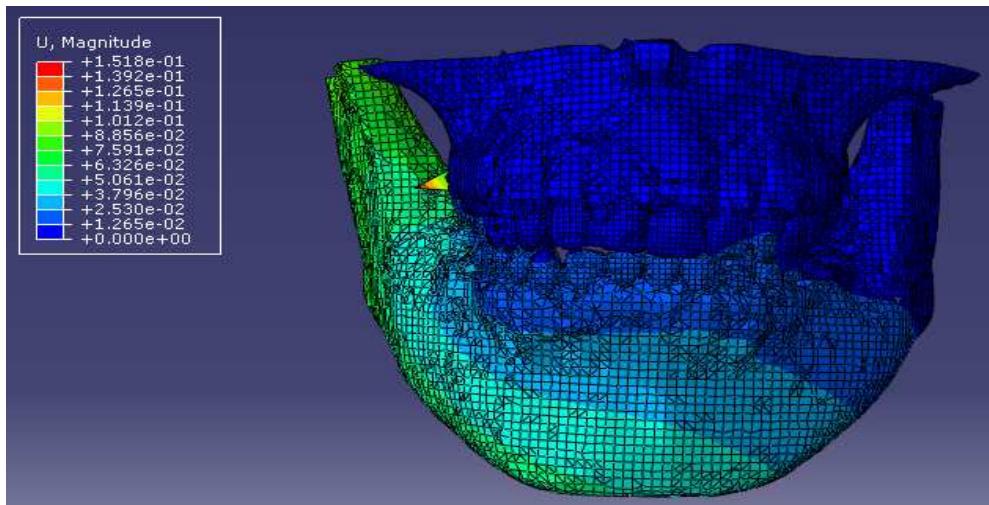


Fig. 4.17: Tabla de desplazamientos y su imagen correspondiente.

En la Fig. 4.18, observamos que las mayores tensiones se producen en la parte derecha siendo los molares y premolares los más afectados. Fig. 4.19.

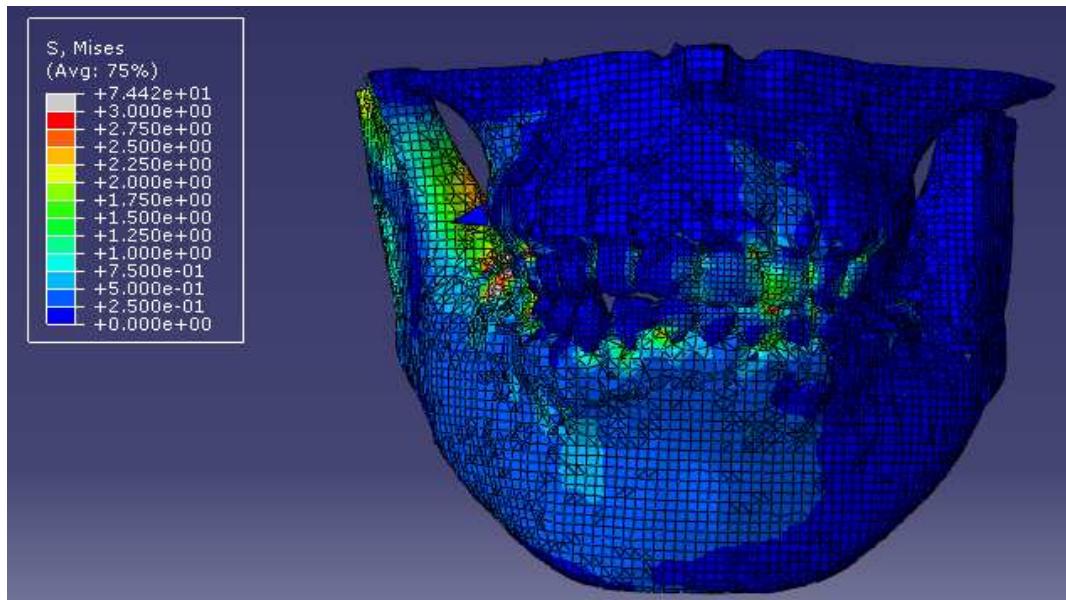


Fig. 4.18: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

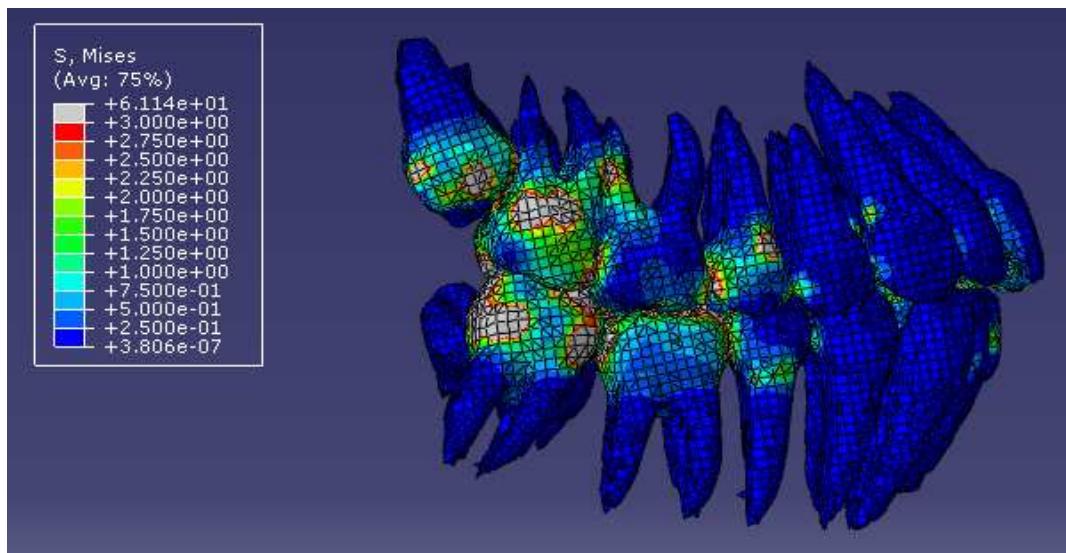


Fig 4.19: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

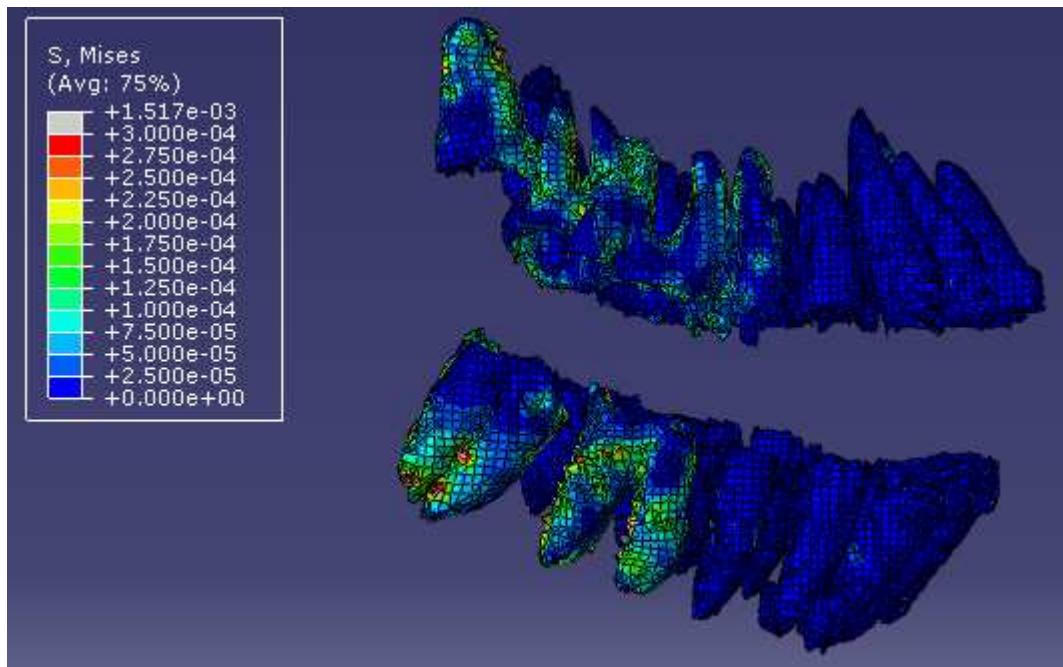


Fig4.20: Tabla de Von Mises (ligamentos)

4.2.3 Solo temporal izquierdo

Los resultados de este caso son prácticamente idénticos al anterior pero relacionados con el lado izquierdo.

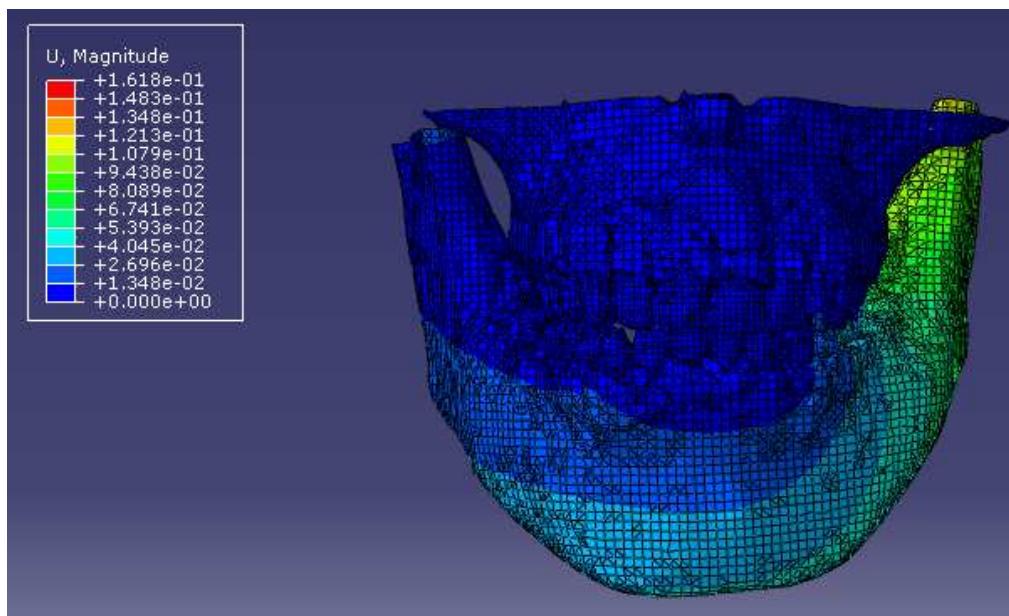


Fig. 4. 21: Tabla de desplazamientos y su imagen correspondiente.

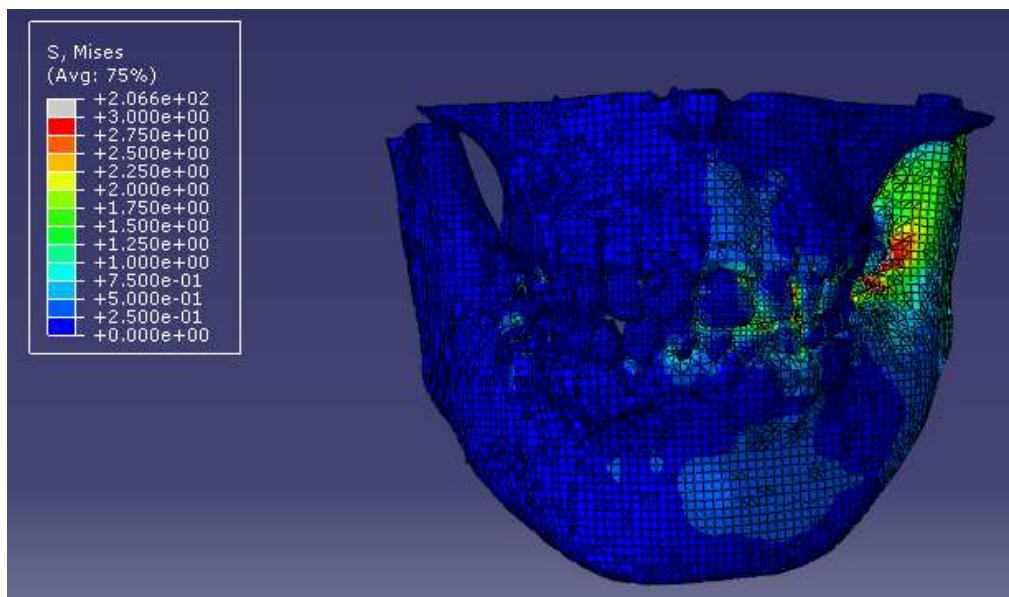


Fig. 4.22: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

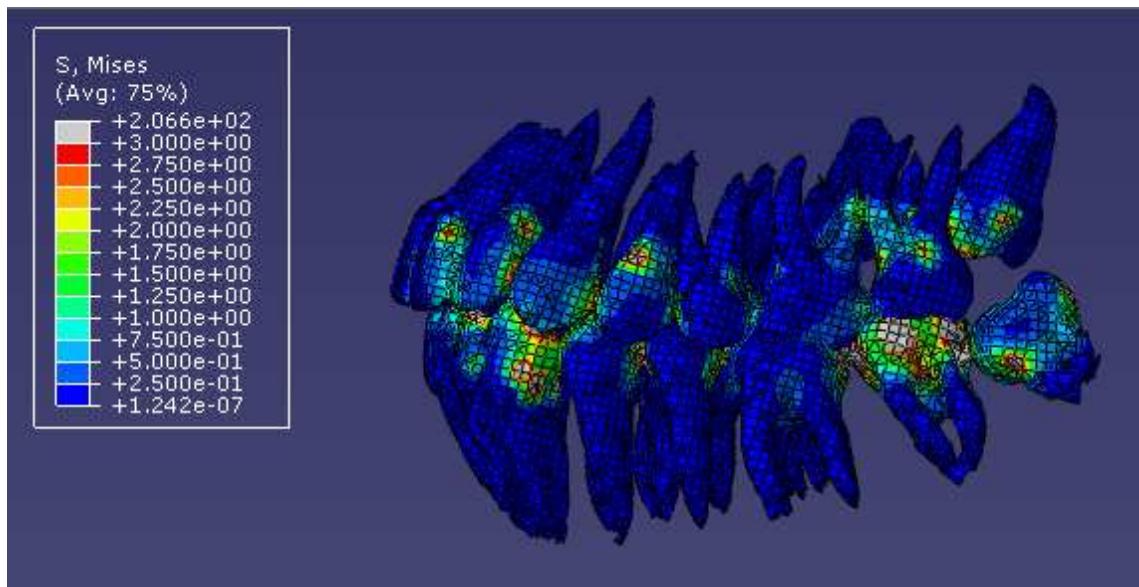


Fig. 4.23: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

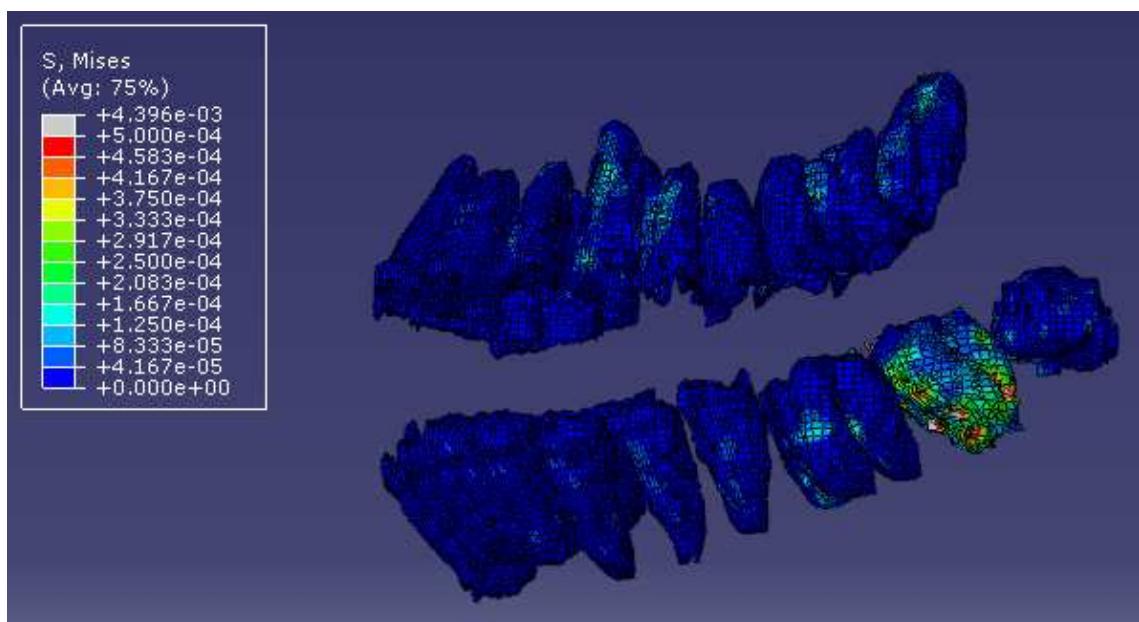


Fig. 4.24: Tabla de Von Mises (ligamentos)

4.3 Acción solamente de los maseteros

4.3.1 Los dos maseteros

Por la acción de los maseteros de ambos lados, se vuelve a apreciar una simetría tangencial de los desplazamientos en la mandíbula. Fig. 4.25.

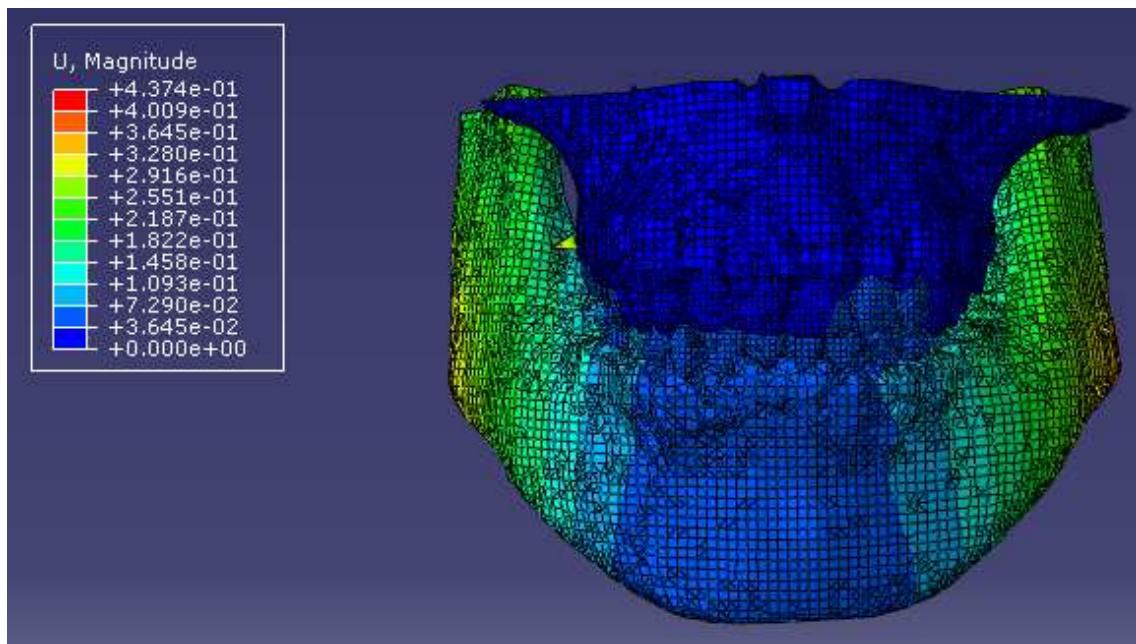


Fig. 4.25: Tabal de desplazamientos y su imagen correspondiente.

Las tensiones de Von Mises también nos indican que están repartidas de una forma simétrica, Fig.4.26.

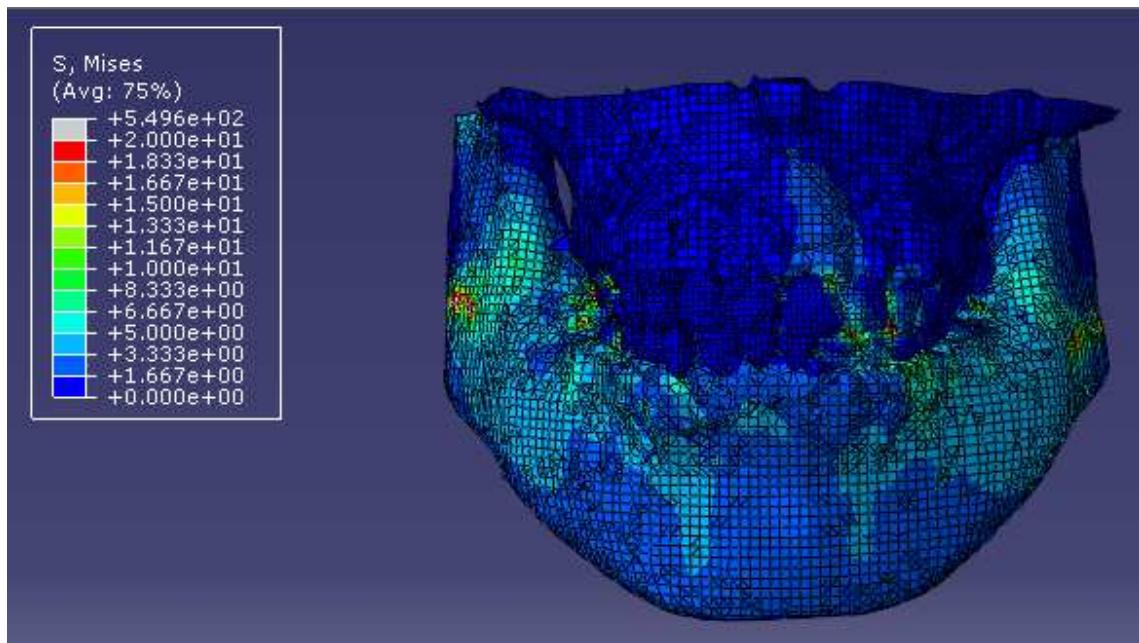


Fig. 4.26: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

Las tensiones máximas vuelven a registrarse en los molares, Fig. 4.27, siendo unas tensiones menores que cuando actuaban los músculos masetero y temporal.

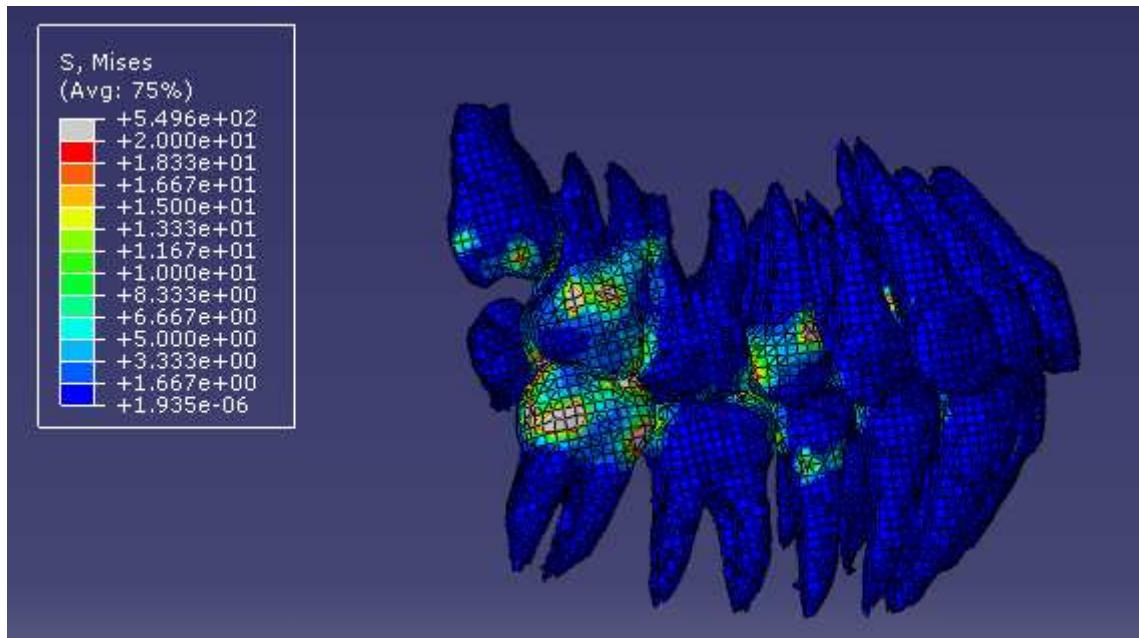


Fig. 4.27: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

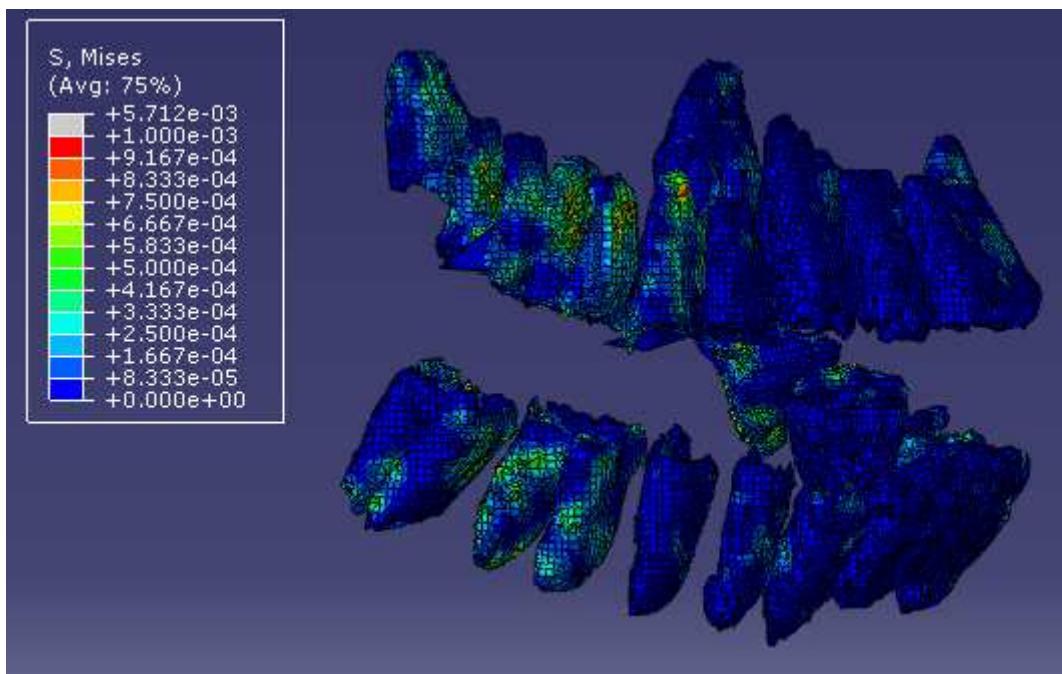


Fig. 4.28: Tabla de Von Mises (ligamentos)

4.3.2 Solo masetero derecho

Cuando solo actúa este músculo se aprecia que ya no existe simetría y los mayores desplazamientos se producen en la zona donde está actuando el masetero, Fig. 4.29.

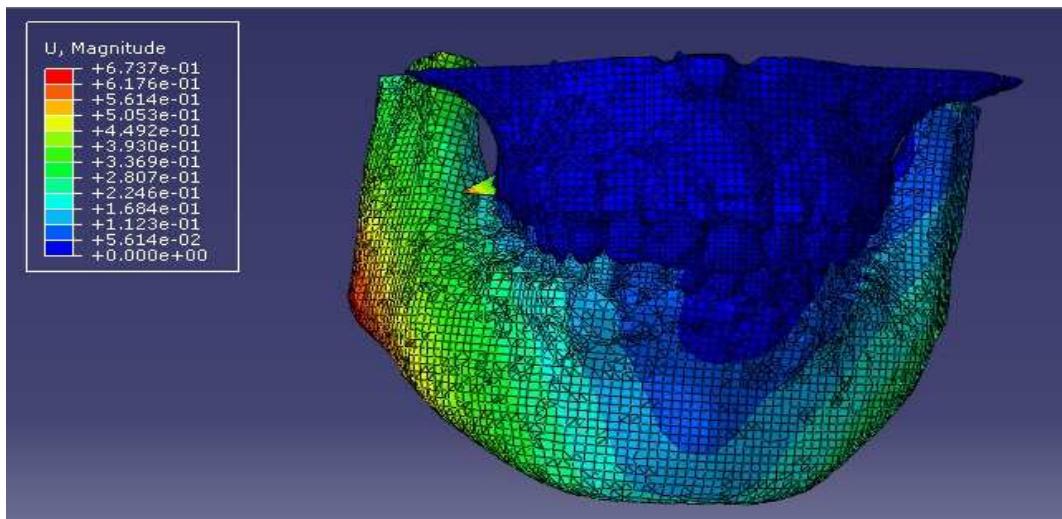


Fig. 4.29: Tabla de desplazamientos y su imagen correspondiente.

Las tensiones máximas también se aprecian en la zona derecha, Fig. 4.30 y prácticamente la parte izquierda apenas sufre esfuerzos.

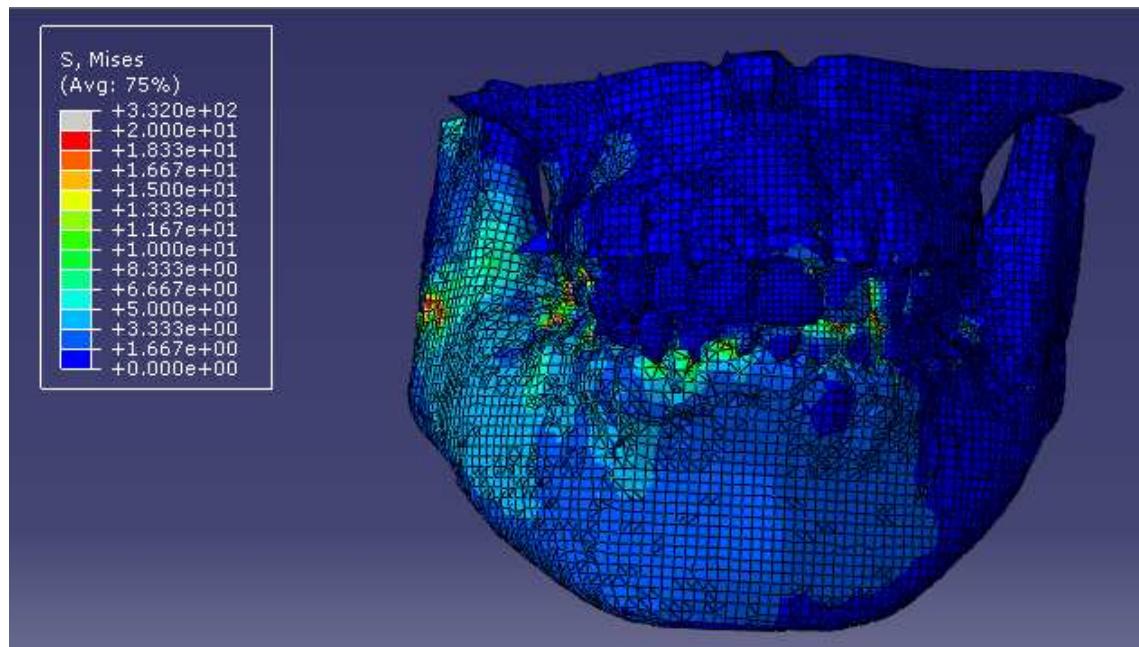


Fig. 4.30: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

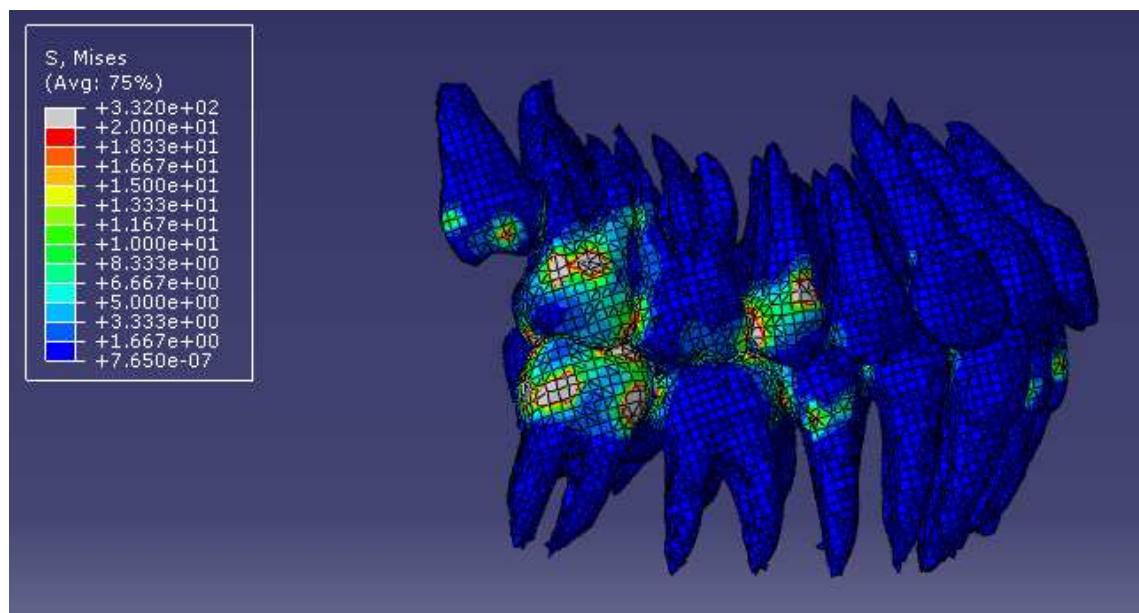


Fig. 4.31: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

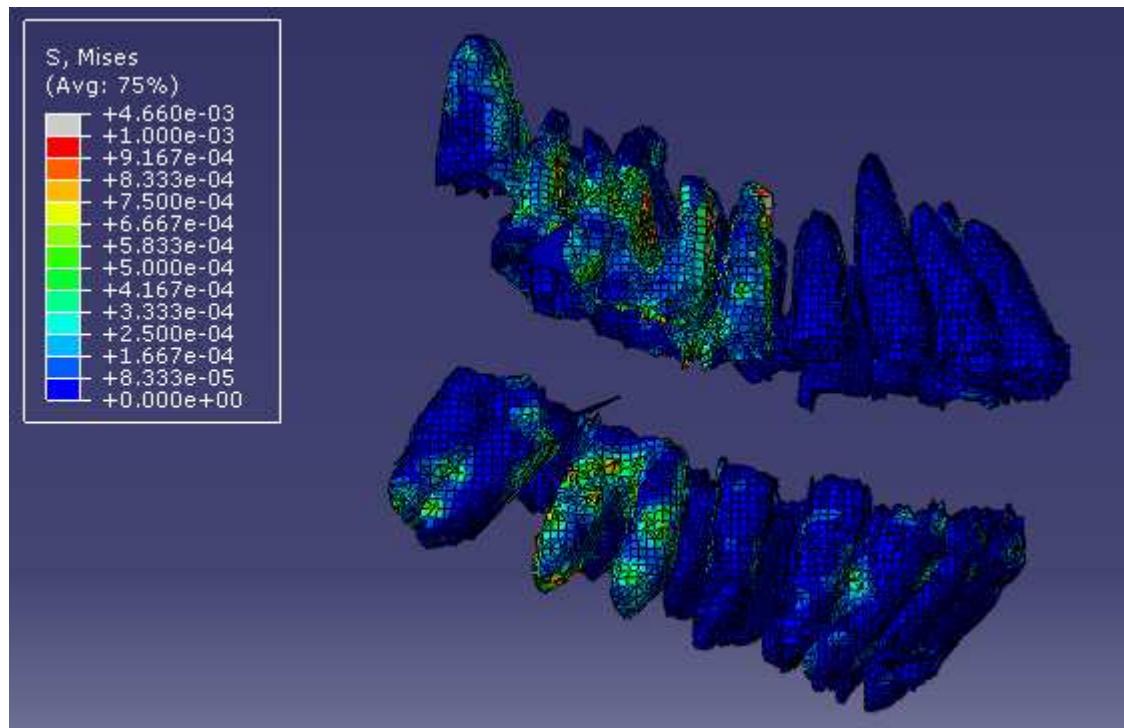


Fig. 4.32: Tabla de Von Mises (ligamentos)

4.3.3 Solo masetero izquierdo

Prácticamente vuelve a tener los mismos resultados que el caso anterior, pero sobre la parte izquierda. Esto nos hace ver, que esta persona tiene una simetría bastante buena en lo que se refiere a su zona mandibular (maxilar inferior y superior, dientes, etc.). Fig. 4.33.

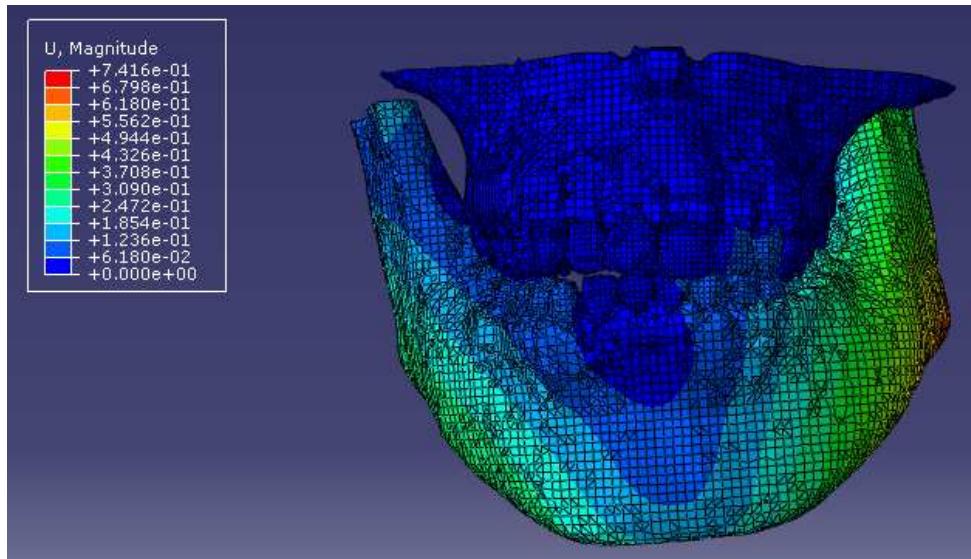


Fig. 4.33: Tabla de desplazamientos y su imagen correspondiente.

Aunque existe una gran simetría como hemos dicho, también observamos que las tensiones máximas sufridas en este caso, sí que son un poco mayores que en el anterior, esto puede ser debido a que tenga más desarrollados los músculos de la parte izquierda y la mandíbula queda ligeramente ladeada hacia el lado izquierdo. Fig. 4.34.

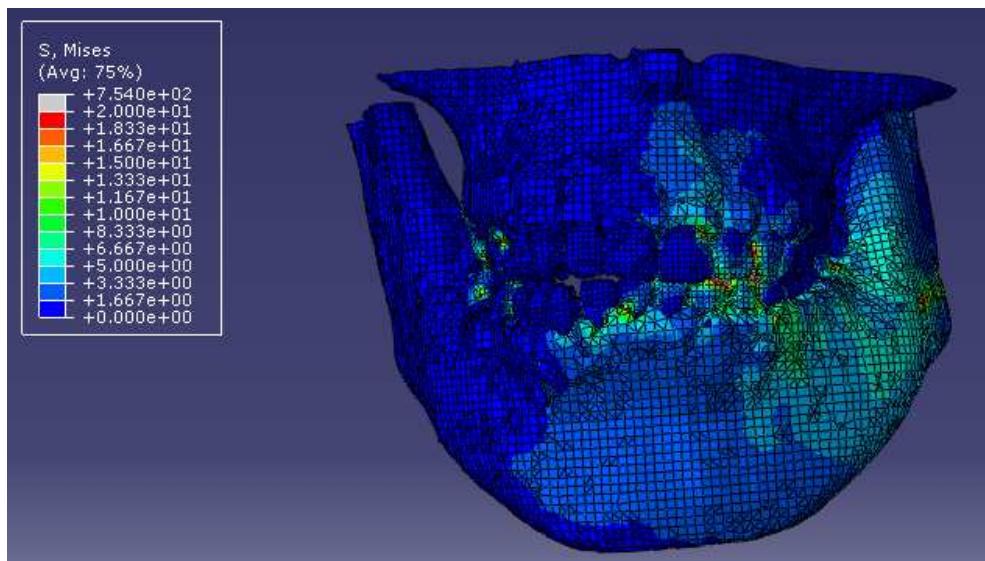


Fig. 4.34: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

Observamos también que debido a la actuación del músculo masetero izquierdo y por la inclinación anteriormente comentada, vuelve a haber tensiones, no solo en molares y premolares sino también en los caninos, Fig. 4.35, debido a que estos tienen contacto entre sí en situaciones como esta, la cual no se produciría en el caso que existiera una simetría aceptable en la acción de los músculos, como ocurre en los casos que actúan los de ambos lados.

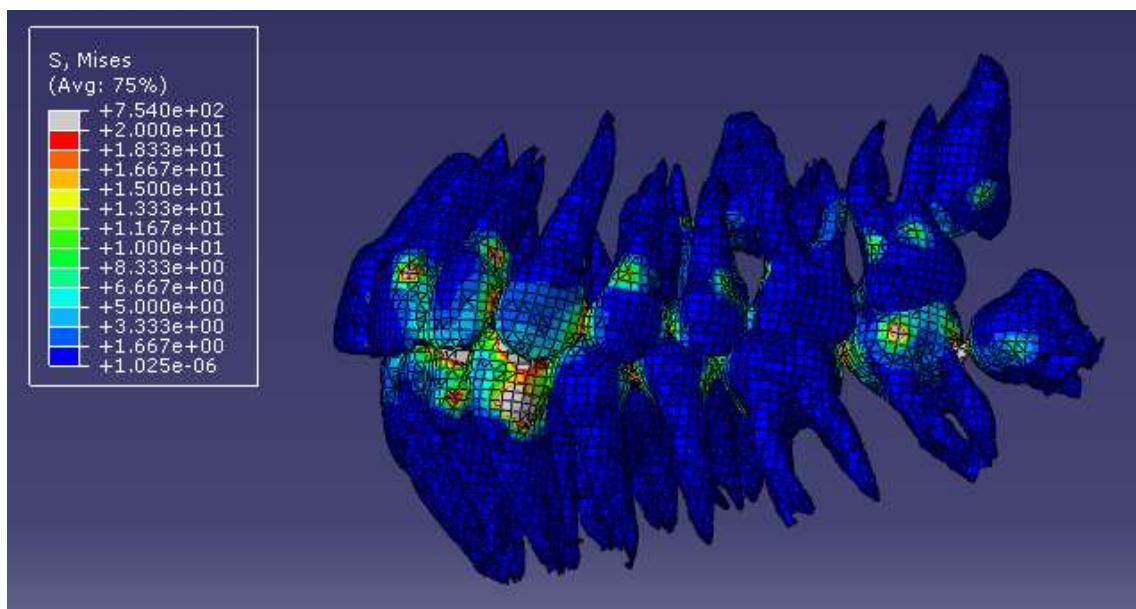


Fig. 4.35: Tabla de Von Mises y su imagen correspondiente.

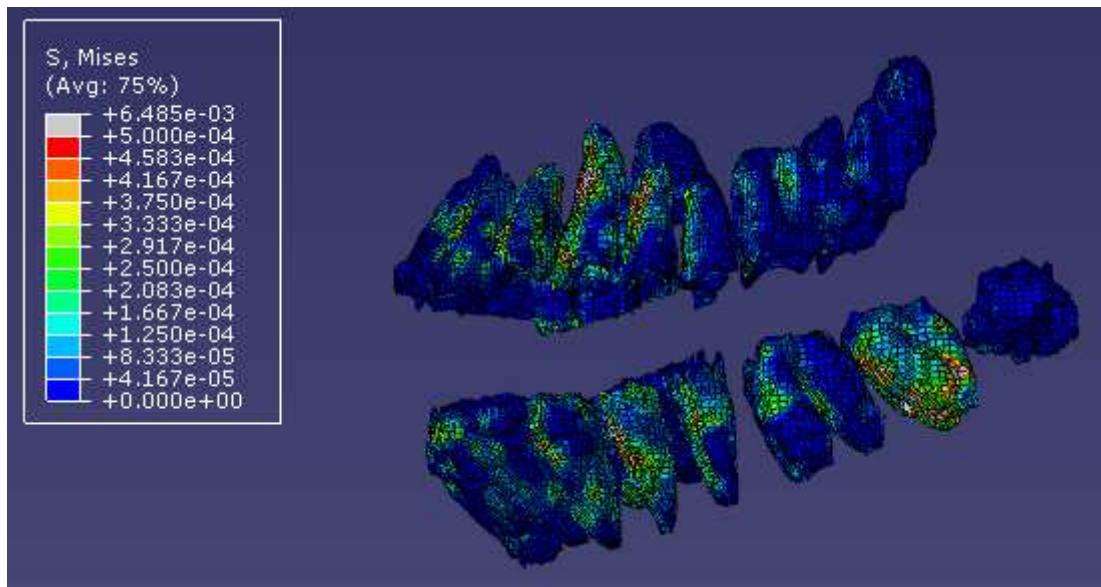


Fig. 4.36: Tabla de Von Mises (ligamentos)

MÚSCULOS QUE ACTÚAN	$\sigma_{máx}$ (MPa) Dientes
Maseteros y Temporales	732.8
Solo Temporales	191.3
Solo Maseteros	549.6

Como es lógico, cuando no actúan ambos músculos las tensiones son más bajas. También observamos que el músculo masetero proporciona ejerce mayor fuerza ya que cuando actúa solamente las tensiones son mayores que cuando lo hace el temporal.

MÚSCULOS LADO DERECHO	$\sigma_{máx}$ (MPa) Dientes
Masetero y temporal	78.53
Temporal	61.24
Masetero	332

Se producen unas tensiones mayores cuando solamente actúa el masetero, debido a que ya no existe simetría y queda muy descompensado el trabajo realizado por ambos músculos.

MÚSCULOS LADO IZQUIERDO	$\sigma_{máx}$ (MPa) Dientes
Masetero y temporal	956.3
Temporal	206.6
Masetero	754

Las tensiones en este lado son mayores que en el derecho, es de suponer que tiene los músculos de esta zona más desarrollados, quizá por trabajarlos más a la hora de la masticación. También se observa que las tensiones son mayores cuando actúan ambos músculos.

MÚSCULOS QUE ACTÚAN	$\sigma_{máx}$ (MPa) Ligamentos
Maseteros y Temporales	$9.844 * 10^{-3}$
Masetero y Temporal derechos	$5.607 * 10^{-3}$
Masetero y Temporal izquierdos	$1.065 * 10^{-2}$
Solo Temporales	$4.330 * 10^{-3}$
Temporal derecho	$1.517 * 10^{-3}$
Temporal izquierdo	$4.396 * 10^{-3}$
Solo Maseteros	$5.712 * 10^{-3}$
Masetero derecho	$4.660 * 10^{-3}$
Masetero izquierdo	$6.485 * 10^{-3}$

Las tensiones en los ligamentos son prácticamente nulas en relación con las obtenidas en los dientes.

5. Conclusiones

Con respecto a los resultados obtenidos, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos en cada uno de los cálculos han sido coherentes, respecto a las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en dichas simulaciones.
- Las tensiones y desplazamientos sufridos para una persona sana, son simétricas. Por lo que no producirá alteraciones importantes en la mandíbula.
- El músculo masetero realiza mayor fuerza que el temporal. Las personas que tengan incapacidad de este músculo, no podrán masticar con fuerza.
- Para este caso en particular, se deduce que los músculos del lado izquierdo están más desarrollados ya que ejercen mayores tensiones en los dientes. Puede llegar en un futuro a desarrollar algún problema ya que aunque existe una gran simetría mandibular, se aprecia una leve inclinación que hace que en la acción de la masticación entren en contacto superficies que no deberían estar.
- Las personas que sufren parálisis parcial o total de uno de los lados, tienen tendencia a deformar el lado que tiene movilidad.

6. Limitaciones

Estos son los resultados y conclusiones del estudio realizado para una persona en particular, se puede llegar a unas conclusiones generales pero los datos numéricos no podríamos generalizarlos.

En relación al material considerado para el hueso, es sabido que habría que introducir modelos más precisos para diferenciar entre hueso cortical y esponjoso o incluso modelos de remodelación ósea. De igual manera, ocurre con los dientes, que no están compuestos en su totalidad por dentina, sino que en su parte superior el material sería el esmalte.

Otra limitación encontrada en el proyecto fue el tamaño de malla. Al ser necesario un tamaño bastante pequeño para afinar la malla, hace complicado su manejo al no disponer de ordenadores potentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andersen, Kim L. *Material parameters and stress profiles within the periodontal ligament.* J. Jp Orthond Soc 1991.
2. Graber S. *Principios generales y técnicas de ortodoncia.* Ed. Panamericana. 1998.
3. Molina Gloria, Runci Ma. Paola. *Visualización de la distribución de esfuerzos sobre el tejido periodontal. Protocolo de investigación.* Universidad Militar. C.E.I.O., Santafé de Bogotá. 1996.
4. Threster RW. *The stress analysis of human teeth.* J. Biomech 1973.
5. Tanne K. *A dynamic analysis of stress in the tooth and its supporting structures.* 1979.
6. ABAQUS User Manual.
7. <http://www.slideshare.net/abnerutria/biomecanica-del-ligamento-periodontal-presentation>
8. <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/643/64325103.pdf>
http://www.ces.edu.co/Descargas/comparacion_esfuerzos_tensiles_compresivos.pdf
9. http://www.odo.unc.edu.ar/documentos/catedras/occlusion/Unidad_4.pdf
10. <http://www.slideshare.net/ncohn/atm-apunte-presentation>
<http://www.monografias.com/trabajos16/trigemino/trigemino.shtml>
11. http://morontecnicaturaimes.blogspot.com/2010_04_01_archive.html
12. http://books.google.es/books?id=a5iSQyjVBPkC&pg=PA505&lpg=PA505&dq=combinaciones+mandibula&source=bl&ots=qqWEiU-gmQ&sig=NPKN_Hqt5ryG2po_h3I4Db3Xd5g&hl=es&ei=pZK2TZX0M4mW8QO8uZ1A&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=OCBqQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false

