



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**ANÁLISIS NUMÉRICO DE UN CASCO DE PROTECCIÓN
FABRICADO DE MATERIAL COMPUESTO FRENTE A IMPACTO
DE BAJA VELOCIDAD CONSIDERANDO PARÁMETROS
ANATÓMICOS.**

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Mecánica

REALIZADO POR

Borja Monsálvez Pozo

TUTORIZADO POR

Ana Vercher Martínez

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a mi tutora del TFG Ana Vercher Martínez por conseguir despertar mi interés en el mundo de los materiales compuestos, por ofrecerme un tema de trabajo muy interesante con unas repercusiones directas dentro de la industria de la equipación del motociclismo y por no parar de enseñarme y ayudarme durante mi realización del TFG.

También quiero agradecer a mi familia por enseñarme lo importante que es el conocimiento, por mostrarme que siempre hay que defender y realizar lo mejor posible cada cosa que uno se proponga hacer y por siempre darme su apoyo en cada paso que he dado.

Resumen

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es analizar, mediante el Método de los Elementos Finitos, la respuesta de un casco de protección fabricado de material compuesto cuando se ve sometido a un impacto coronal normalizado de baja velocidad, teniendo en cuenta diferentes parámetros anatómicos.

En este trabajo se abordará un problema muy poco estudiado y que consiste en analizar la influencia que tienen algunos parámetros morfométricos de la cabeza humana en la respuesta del sistema al recibir un impacto sobre el elemento de protección. Se analizarán tres tipos de cabeza de hombre y tres tipos de cabeza de mujer. Los tres tipos se corresponderán con tres tallas para ambos géneros: grande, estándar y pequeña. Los seis modelos geométricos se obtendrán de fuentes bibliográficas.

El proceso de generación de los modelos numéricos se realizará en el entorno de Ansys Workbench. Se supondrá que los modelos de la cabeza presentan propiedades isotropas siguiendo el material del dummy o prototipo estándar. El casco de protección se modelará de acuerdo con una estructura tipo sándwich formada por dos pieles de fibra de carbono y resina epoxi, y un núcleo de espuma. Por otro lado, el análisis del impacto se realizará de acuerdo con la normativa. En la resolución numérica se empleará un procedimiento de resolución explícita.

Se estudiará la respuesta en términos de fuerza y aceleración principalmente, ya que son las variables principales que pueden causar fractura craneal y/o daño cerebral. Se analizará, entre otras cosas, la influencia de los parámetros anatómicos y las diferentes configuraciones de espesor de las capas que constituyen el casco en la respuesta del sistema.

Palabras clave

Casco de protección; Morfometría de cabeza; Método de Elementos Finitos; Método explícito; Estructura sándwich;

Resum

L'objectiu principal d'aquest Treball Fi de Grau és analitzar, mitjançant el Mètode dels Elements Finitos, la resposta d'un casc de protecció fabricat de material compost quan es veu sotmès a un impacte coronal normalitzat de baixa velocitat, tenint en compte diferents paràmetres anatòmics.

En aquest treball s'abordarà un problema molt poc estudiat i que consisteix a analitzar la influència que tenen alguns paràmetres morfomètrics del cap humà en la resposta de sistema a rebre un impacte sobre l'element de protecció. S'analitzaran tres tipus de cap d'home i tres tipus de cap de dona. Els tres tipus es correspondran amb tres talles per a tots dos gèneres: gran, estàndard i petita. Els sis models geomètrics s'obtiniran de fonts bibliogràfiques.

El procés de generació dels models numèrics es realitzarà a l'entorn de Ansys Workbench. Es suposarà que els models del cap presenten propietats isòtropes seguint el material dummy o prototip estàndard. El casc de protecció es modelarà d'acord amb una estructura tipus Sandwich formada per dues pells de fibra de carboni i resina epoxi, i un nucli d'escuma. D'altra banda, l'anàlisi de l'impacte es realitzarà d'acord amb la normativa. En la resolució numèrica s'emprarà un procediment de resolució explícita.

S'estudiarà la resposta en termes de força i acceleració principalment, ja que són les variables principals que poden causar fractura cranial i / o dany cerebral. S'analitzarà, entre altres coses, la influència dels paràmetres anatòmics i les diferents configuracions de gruix de les capes que constitueixen el casc en la resposta de el sistema.

Paraules clau

Casc de protecció; morfometria del cap; Mètode dels Elements Finitos; Mètode Explícit; Estructura Sandwich;

Abstract

The main objective of this Final Degree Project is to analyse, using the Finite Element Method, the response of a protective helmet made of composite material when it is subjected to a normalized low-speed coronal impact, taking into account different anatomical parameters.

In this work, a very little studied problem will be approached, which consists of analysing the influence that some morphometric parameters of the human head have on the response of the system when receiving an impact on the protection element. Three types of men's heads and three types of women's heads will be analysed. The three types will correspond to three sizes for both genders: large, standard and small. The six geometric models will be obtained from bibliographic sources.

The process of generating the numerical models will be carried out in the Ansys Workbench environment. It will be assumed that the head models have isotropic properties following the material of the dummy or standard prototype. The protective helmet will be modeled according to a sandwich structure formed by two skins of carbon fiber and epoxy resin, and a foam core. On the other hand, the impact analysis will be carried out in accordance with the regulations. In numerical resolution, an explicit resolution procedure will be used.

The response in terms of force and acceleration will be studied mainly, since they are the main variables that can cause skull fracture and / or brain damage. Among other things, the influence of the anatomical parameters and the different thickness configurations of the layers that make up the helmet on the response of the system will be analysed.

Keywords

Protective helmet; Head morphometric parameters; Finite Element Method; Explicit Dynamics method; Sandwich structure;

Contenido General

Documento 1. Memoria.....	13
Documento 2. Pliego de Condiciones	61
Documento 3. Presupuesto.....	66

Documento 1

Memoria

Índice

1. OBJETIVO.....	18
2. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	18
2.1. Estado del arte.....	18
2.1.1. Cascos de protección en la actualidad: motociclismo, deporte, militar... 18	
2.1.2. Simulación del impacto a baja/media velocidad en cabeza.....	20
2.1.3. Aspectos relevantes de la anatomía de cabeza humana	21
2.2. Motivación	23
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	24
3.1. Comportamiento elástico de los plásticos reforzados con fibra larga	24
3.1.1. Introducción.....	24
3.1.2. Constantes elásticas. Comportamiento transversamente isótropo.....	25
3.1.3. Ley constitutiva: Ley de Hooke Generalizada	26
3.2. Análisis Dinámico Explícito	28
4. GENERACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DEL CONJUNTO CABEZA-CASCO	30
4.1. Modelos anatómicos de cabeza hombre/mujer.....	30
4.1.1. Obtención de la geometría mediante interfaz libre de generación de	
modelos virtuales.....	30
4.1.2. Características de los modelos hombre/mujer seleccionados	32
4.2. Generación de los modelos numéricos de cabeza con Ansys Workbench....	35
4.2.1. Tratamiento geométrico.....	35
4.2.2. Definición del material	36
4.2.3. Generación del modelo del impactador.....	37
4.3. Generación del modelo del casco de protección.....	38
4.3.1. Hipótesis 1: Modelo de casco basado en escalado.....	38
4.3.2. Hipótesis 2: Modelado del material empleando homogeneización numérica	
39	
4.4. Generación del modelo del conjunto cabeza-casco.....	45
4.4.1. Hipótesis 3: Conformidad de malla	45
4.5. Carga y condiciones de restricción	46
4.5.1. Normativa	46
4.5.2. Control de la velocidad y la posición del impactador.....	46
4.5.3. Tiempo de integración	47
4.5.4. Condiciones de restricción.....	47
5. RESULTADOS	48
5.1. Análisis de aceleraciones	49
5.2. Análisis de fuerzas.....	53
5.3. Estudio de la influencia del tamaño de la cabeza en la respuesta mecánica.	
Comparativa entre modelos de cabeza hombre/mujer.....	54
6. CONCLUSIONES.....	58

7. BIBLIOGRAFÍA.....60

Índice de Figuras

Figura 1. Capas de casco de motocicletas.	Pág. 18
Figura 2. Medidas características de la cabeza humana.	Pág. 23
Figura 3. Ciclo análisis explícito.	Pág. 30
Figura 4. Página de generación de cabezas humanas.	Pág. 31
Figura 5. Parámetros morfométricos del generador de cabeza humana.	Pág. 31
Figura 6. <i>Landmarkers</i> definidos por el programa de generación de cabezas.	Pág. 32
Figura 7. Modelos de cabeza pequeña de hombre y mujer.	Pág. 34
Figura 8. Modelos de cabeza mediana de hombre y mujer.	Pág. 34
Figura 9. Modelos de cabeza grande de hombre y mujer.	Pág. 34
Figura 10. Geometría con protrusiones. Modelo de cabeza de hombre pequeña.	Pág. 35
Figura 11. Geometría sin protrusiones. Modelo de cabeza de hombre pequeña.	Pág. 36
Figura 12. Transformación de superficie (izquierda) a sólido (derecha). Modelo de cabeza de hombre pequeña.	Pág. 36
Figura 13. Geometría del impactador de masa 5 kg (izquierda). Modelo completo (derecha).	Pág. 37
Figura 14. Modelo geométrico del casco de protección.	Pág. 38
Figura 15. Planos de simetría en un material ortótropo.	Pág. 39
Figura 16. Deformación normal unitaria en la dirección x.	Pág. 42
Figura 17. Deformación normal unitaria en la dirección y.	Pág. 42
Figura 18. Deformación normal unitaria en la dirección z.	Pág. 43
Figura 19. Deformación angular unitaria en el plano yz.	Pág. 43
Figura 20. Deformación angular unitaria en el plano xz.	Pág. 44
Figura 21. Deformación angular unitaria en el plano xy.	Pág. 44
Figura 22. Interacción cabeza-casco.	Pág. 45
Figura 23. Restricción en la base del modelo de cabeza.	Pág. 48
Figura 24. Modelo completo: casco, cabeza e impactador (Arriba). Deformación sufrida por el casco tras el impacto (Abajo).	Pág. 49
Figura 25. Aceleración en los 3 modelos de cabeza masculina.	Pág. 51
Figura 26. Aceleración en los 3 modelos de cabeza femenina.	Pág. 52
Figura 27. Comparativa de aceleraciones entre modelos de cabeza pequeña de hombre y mujer.	Pág. 55
Figura 28. Comparativa de aceleraciones entre modelos de cabeza mediana de hombre y mujer.	Pág. 56
Figura 29. Comparativa de aceleraciones entre modelos de cabeza grande de hombre y mujer.	Pág. 57

Índice de Tablas

Tabla 1. Medidas características para la generación de modelos numéricos; (P) pequeña, (M) mediana, (G) grande.	Pág. 33
Tabla 2. Casos de carga para la estimación de la matriz de rigidez del material por homogeneización numérica.	Pág. 41
Tabla 3. Rango de aceleraciones sufridas por las 6 cabezas (SI).	Pág. 50
Tabla 4. Rango de aceleraciones sufridas por las 6 cabezas (g).	Pág. 50
Tabla 5. Volúmenes de los 6 modelos de cabeza analizados.	Pág. 53
Tabla 6. Fuerza experimentada por la cabeza para los 6 modelos analizados.	Pág. 54

1. OBJETIVO

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es analizar, mediante el Método de los Elementos Finitos, la respuesta mecánica de un casco de protección fabricado de material compuesto cuando se ve sometido a un impacto coronal normalizado de baja velocidad, teniendo en cuenta diferentes parámetros anatómicos de la cabeza humana.

2. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

2.1. Estado del arte

2.1.1. Cascos de protección en la actualidad: motociclismo, deporte, militar.

Hoy en día, gracias a la investigación y el desarrollo que hay detrás de los materiales compuestos se ha demostrado su gran utilidad para ciertas áreas en las que se necesitan componentes de una gran rigidez y resistencia a la vez que peso reducido.

Dentro de estas áreas se encuentran los cascos para motocicletas, uso militar y diversos deportes que requieran protección de la cabeza.

En primer lugar, con respecto a los cascos de motocicletas, su configuración habitual es tipo sándwich donde se encuentran las pieles y el núcleo.



Figura 1. Capas de casco de motocicleta.¹

¹ Obtenido de: <http://www.motociudadanos.com/analisis/cascos>

Como se puede observar en la Figura 1 hay una capa exterior (piel) formada normalmente por un tejido compuesto de fibras que pueden estar embebidas ligeramente en una matriz polimérica. Esta capa es la encargada de resistir el impacto y que el objeto no atravesase el casco y llegue a la cabeza. Las pieles más comunes que se utilizan en la fabricación de los cascos suele ser fibra de carbono o fibra de vidrio junto con epoxi o poliéster.

A continuación, se encuentra una segunda capa llamada núcleo y es la encargada de absorber la mayor parte de la energía del impacto. El material a utilizar como núcleo es más variado que en el caso de las fibras y matriz, suele ser un material tipo de espuma, que, como se ha comentado anteriormente, ha de tener buenas características a la hora de absorber la energía, tal es el caso del polietileno.

Para terminar de formar la estructura tipo sándwich se añade otra capa en el interior del casco. Su principal finalidad es proporcionar aislamiento y confort a la cabeza.

Cabe mencionar la normativa vigente ECE/ONU R22 que Europa prevé en cuanto a la protección y test para los cascos de protección de motocicletas. España desarrolla el Reglamento número 22 sobre prescripciones uniformes relativas a la homologación de cascos de protección para conductores y pasajero de motocicletas y ciclomotores.²

Por otro lado, en cuanto a los cascos de protección que se utilizan en distintos deportes existe una gran cantidad de tipología, construcción y normativa. Depende fundamentalmente del deporte a realizar y de las exigencias que éste necesite, como, por ejemplo, en el ciclismo. Dentro de esta modalidad se busca un ligereza y protección frente a caídas, por tanto, la utilización de materiales compuestos será lo idóneo.

Para finalizar, se puede observar la utilización de materiales compuestos para la fabricación de cascos militares. Cabe diferenciar que, aunque se utilice fibras y matrices como los dos anteriores, éstos se caracterizan por la necesidad de proteger la cabeza frente a impactos de proyectil y por tanto el uso de fibras de carbono y vidrio suele ser reemplazado por la utilización de fibras de aramida.

A pesar de la gran cantidad de cascos y usos de los mismos, el trabajo se centrará en el estudio y desarrollo de los cascos de motocicleta y ciclomotores.

² Visualizado día 5/5/2021 en: <https://www.boe.es/boe/dias/1984/12/15/pdfs/A36187-36204.pdf>

2.1.2. Simulación del impacto a baja/media velocidad en cabeza

Como se ha abordado en el punto 2.1.1 el mundo del motociclismo y los deportes como, por ejemplo, el fútbol americano, ha hecho posible una rápida evolución en los métodos y formas de diseñar y analizar los cascos de protección. No solo los tipos de material que se usan hoy en día, sino también analizar el comportamiento mecánico que tendrán dichos elementos de protección en un posible accidente o golpe y cómo se transmite la carga recibida a la cabeza.

Se debe tener en consideración que los accidentes y golpes más habituales en este contexto suceden a baja y media velocidad por lo que existe un gran interés en conocer la respuesta del conjunto casco-cabeza antes esta situación.

La realización de estos análisis presenta diversas ventajas a la hora de elaborar cascos de protección. Una de ellas es el ahorro de pruebas de ensayos empíricos y por tanto reducir costes. De esta forma se puede realizar múltiples diseños para encontrar el más eficiente y una vez escogido realizar en él los ensayos empíricos exigidos por la normativa.

Se puede diferenciar entre ensayos de baja/media velocidad y alta velocidad comparando la velocidad de propagación de la onda en el medio elástico que recibe el impacto con la propia velocidad del impacto. Es decir, se podrá decir que se tiene un ensayo de baja velocidad cuando la velocidad del impacto es inferior a la velocidad de propagación de la onda generada en el objeto impactado, de esta forma el material se deforma más allá de la zona donde se ha producido el impacto. Un ensayo característico capaz de reproducir este fenómeno es el péndulo Charpi.

Sin embargo, se puede hablar de ensayos de alta velocidad cuando la velocidad de impacto es superior a la velocidad de propagación de la onda y por ello solo la zona donde ha tenido lugar el impacto se ve afectada. Se podría decir que más allá de la zona de impacto el material no se ve dañado. Un claro ejemplo de esta modalidad de ensayo es el test o ensayo balístico.

En los test de impacto en cascos de motocicletas la velocidad típica de ensayo va desde los 4 m/s hasta los 8 m/s. Como se puede observar en la normativa ECE/ONU R22. Este rango de velocidades se puede considerar baja velocidad.

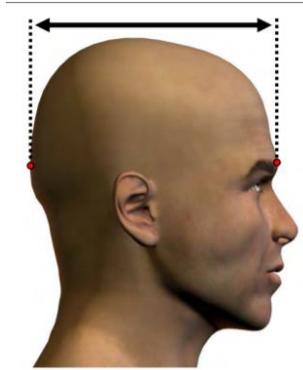
2.1.3. Aspectos relevantes de la anatomía de cabeza humana

A la hora de realizar los análisis por elementos finitos del casco se va a tener en consideración las diferencias antropométricas de la cabeza humana. Se observará las diferencias que puede haber al modificar el tamaño de la cabeza, así como las diferencias anatómicas que existen en la estructura craneal de mujeres y hombres.

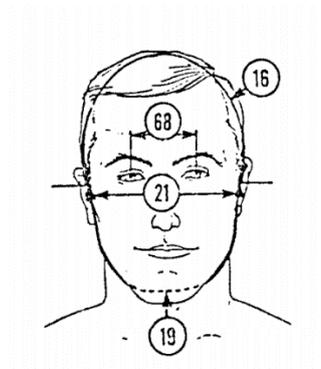
Existe una gran cantidad de parámetros (longitudes y ángulos) que determinan la forma y el tamaño de la cabeza humana. Para establecer las diferencias entre las cabezas generadas que se utilizarán para el análisis de impacto, a continuación, se van a definir las longitudes más importantes que se han utilizado y/o tienen mayor relevancia:

- *Head length* o longitud máxima de la cabeza, es la distancia que hay entre el punto medio entre ambas cejas (Glabela) y la parte más alejada de la cabeza (Opistocraneo), ver Figura 2 (a)
- *Face width* o anchura de la cara, es la distancia que hay desde el punto exterior del ojo donde coincide el parpado superior e inferior hasta el mismo punto del otro ojo, ver Figura 2 (b)
- *Tragion on top of the head*, es la distancia en vertical que hay entre el punto más alto del tragus (Tragion) y el plano tangente en lo alto de la cabeza, ver Figura 2 (c)
- *Bitragion width*, la longitud que hay entre los dos Tragion, ver Figura 2 (d)
- *Ear height*, es la altura que tiene la oreja, ver Figura 2 (e)
- *Head circumference*, es la longitud de la circunferencia (por la superficie de la cabeza) formada por el plano perpendicular al “plano sagital y medio” y que pasa a través de la *head length* que se ha descrito anteriormente, ver Figura 2 (f)
- *Arc length*, es el arco medido alrededor de la superficie de la cabeza y sus puntos inicial y final son la Glabela y el Occiput (es un punto que se encuentra en la parte trasera de la base del cráneo y que se encuentra inmediatamente por encima del cuello), ver Figura 2 (g)
- *Arc width*, arco medido alrededor de la superficie de la cabeza y sus punto inicial y final son los Tragion, ver Figura 2 (h)
- *Bitragion chin arc*, arco medido alrededor de la superficie de la cabeza que va desde el Tragion izquierdo hasta el derecho pasando justo por debajo de la barbilla ver Figura 2 (i)

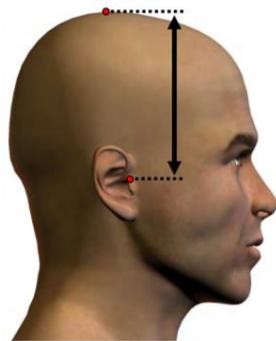
- *Bitragion submandibular arc*, arco medido alrededor de la superficie de la cabeza que va desde el Tragion izquierdo hasta el derecho pasando por el punto donde termina la mandíbula y empieza el cuello, ver Figura 2 (j)



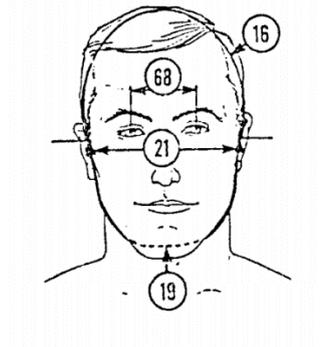
(a) Head length



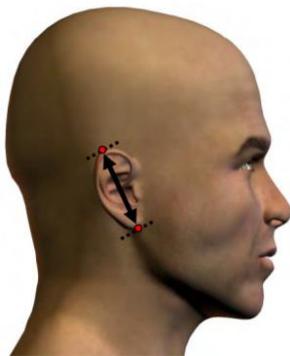
(b) Face width [68]



(c) Tragion on top of the head



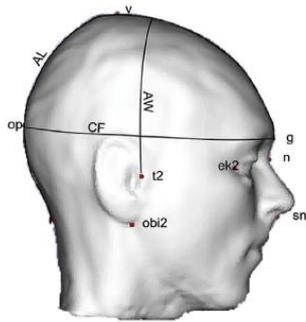
(d) Bitragion width [21]



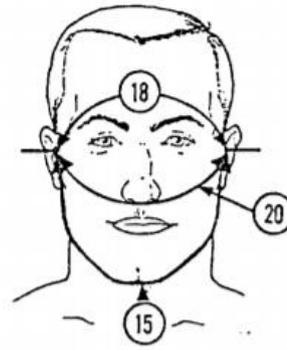
(e) Ear height



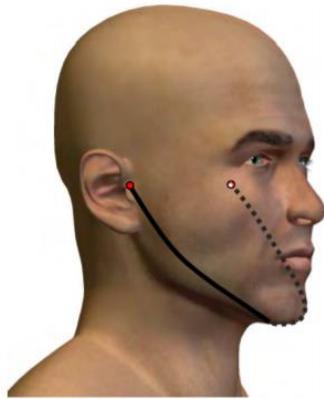
(f) Head circunferencia



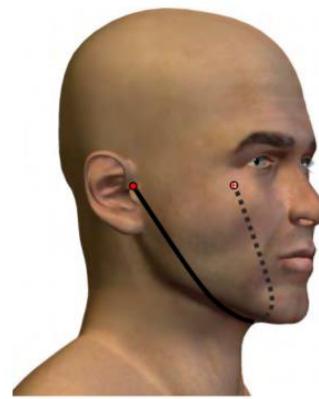
(g) Arc length



(h) Arc width



(i) Bitrignon chin arc



(j) Bitrignon submandibular arc

Figura 2. Medidas características de la cabeza humana. Figura adaptada de *Measurer's handbook: Us Army and Marine Corps Anthropometric Surveys, 2010-2011; A New Data Structure and Workflow for using 3D Anthropometry in the Design of Wearable Products; 1988 Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel: Pilot Summary Statistics.*

2.2. Motivación

Una de las principales motivaciones de este Trabajo Fin de Grado es la escasez de análisis de impacto a baja velocidad sobre un casco como elemento de protección, que aborden la influencia de los parámetros morfométricos de la cabeza humana en la respuesta mecánica del conjunto casco-cabeza. Asimismo, es de resaltar la repercusión que tienen estos análisis en el diseño de los elementos de protección de cabeza.

Otra de las motivaciones para la realización de este trabajo académico es la obtención del título de Graduado en Ingeniería Mecánica por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la UPV.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Comportamiento elástico de los plásticos reforzados con fibra larga

3.1.1. Introducción

La utilización de dos o más materiales combinados a escala macroscópica ha hecho que sean excelentes materiales para el mundo de la ingeniería. Una de sus principales ventajas frente a los materiales convencionales es su efecto sinérgico, es decir, algunas propiedades que tiene el compuesto son superiores que las propiedades de cada uno de sus componentes. La propiedad más representativa que tienen estos materiales es su elevada resistencia y rigidez específica.

En este Trabajo nos centraremos en los materiales compuestos por dos elementos claramente diferenciados, que son la fibra y la matriz polimérica. La fibra es extremadamente rígida y resistente, por ello es la encargada de resistir los esfuerzos que sufre el material. Sin embargo, la matriz es la encargada de transmitir los esfuerzos y dotar a las fibras de una protección ya que éstas se encuentran embebidas en la matriz (aglutinante)

Las principales configuraciones que se adoptan a la hora de elaborar materiales compuestos son los laminados tipo membrana y las estructuras tipo emparedado o sándwich. El laminado se basa en una secuencia de capas apiladas fabricadas normalmente de material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra unidireccional o tejida. Las fibras pueden variar su orientación entre láminas. Por otro lado, la secuencia de apilado y el espesor de cada lámina pueden ser distintos según el objetivo que se busque. Los laminados tipo membrana se emplean cuando existe un estado de carga contenido en el plano del componente (tracción, compresión y cortante). Cuando una de las láminas de esta secuencia es un núcleo de mayor espesor que las demás la configuración se denomina sándwich. En el caso de los cascos que más tarde se analizarán se ha utilizado una estructura tipo sándwich piel-núcleo-piel, donde las pieles son láminas de fibra tejida y continua y el núcleo es un material isótropo. La configuración tipo sándwich se emplea principalmente cuando tenemos tanto cargas de membrana como flexión.

3.1.2. Constantes elásticas. Comportamiento transversalmente isótropo.

Para poder conocer el comportamiento que tendrá un material elástico, es necesario conocer o ser capaces de obtener las constantes elásticas que lo definen, ya sea por medio de ensayo, modelos numéricos, modelos analíticos o semiempíricos.

El número de constantes que existen para poder definir el comportamiento de un material elástico varía según su naturaleza. Para el caso de un material anisótropo son:

- Módulo de Young, E_i , es el coeficiente que relaciona la tensión normal aplicada sobre el material elástico lineal con la deformación longitudinal que este experimenta, siempre y cuando la tensión aplicada no supere el límite elástico del material.
- Coeficiente de Poisson, ν_{ij} , es el coeficiente que relación la deformación que sufre el material en la dirección en j cuando únicamente se le aplica una tensión normal en i .
- Módulo de rigidez o cizalladura, G_{ij} , es el coeficiente que relaciona la tensión tangencial aplicada sobre el material elástico lineal con la deformación angular, siempre y cuando la tensión aplicada no supere el límite elástico a cortante del material.
- Coeficientes de influencia mutua, está formado por dos tipos de coeficientes, el de primer tipo $\eta_{i,jk}$, que relacionan la deformación longitudinal en la dirección i con la tensión tangencial en el plano jk que sufre el material; y el de segundo tipo $\eta_{ij,k}$, que relaciona la deformación angular en el plano ij con la tensión normal que sufre el material en la dirección k .
- Coeficientes de Chentsov, $\mu_{ij,kl}$, es el coeficiente que relaciona la deformación angular en el plano ij cuando el material esta sometido a una tensión tangencial en la dirección del plano kl .

Como se ha comentado anteriormente, el número de constantes elásticas que definen un material varía según el tipo de material que se este analizando. Se puede distinguir entre material triclinico o anisótropo, monoclinico, ortótropo, transversalmente isótropo e isótropo. Para poder distinguir ante qué material se está trabajando hay que determinar el número de planos de simetría que se tiene, ya que es la característica que nos determina qué tipo de material es. Por tanto, si tenemos un material que no tiene ningún plano de simetría será un material triclinico, si tiene un solo plano de simetría será un material monoclinico y si tiene tres planos de simetría será ortótropo.

No obstante, si uno de esos tres planos es de isotropía entonces será un material transversalmente isótropo. Por último, si el material posee infinitos planos de simetría significará que es isótropo.

Sin embargo, hasta un material transversalmente isótropo puede tener un comportamiento anisótropo o triclinico. Esto sucede por el sistema de referencia que se escoja, ya que si este sistema de referencia no coincide con los planos de simetría se considera que no esta orientado y por lo tanto tendrá un comportamiento triclinico, aunque el material sea monoclinico, ortótropo o transversalmente isótropo.

Cuando se trabaja con materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con fibra aleatoriamente distribuida lo más habitual es que se tenga un material transversalmente isótropo. Este tipo de material se caracteriza porque en la matriz de flexibilidad hay 12 contantes distintas de 0, de las cuales 5 de estas serían independientes y por tanto el resto serían combinaciones de éstas.

3.1.3. Ley constitutiva: Ley de Hooke Generalizada

La ley de Hooke Generalizada permite relacionar las 6 tensiones, $\{\sigma\}$, que pueda experimentar un punto del material como una combinación lineal de las 6 deformaciones, $\{\epsilon\}$, que puede sufrir el material en dicho punto. Se trata de una ley basada en la evidencia experimental.

Lo más habitual es plantear esta ley constitutiva de forma matricial. De esta manera se puede escribir La ley de Hooke Generalizada como:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

O su forma reducida:

$$\{\sigma\} = [C]_{6 \times 6} * \{\epsilon\} \quad (2)$$

Pero, para poder relacionar de forma más intuitiva las constantes elásticas con la ley de Hooke generalizada se trabajará con la matriz de flexibilidad $[S]_{6 \times 6}$, en lugar de su inversa, la matriz de rigidez $[C]_{6 \times 6}$. Ambas matrices son simétricas.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

O su forma reducida:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\mathbf{S}]_{6 \times 6} * \{\boldsymbol{\sigma}\} \quad (4)$$

Al personalizar al caso del material transversalmente isótropo y suponiendo que el plano de simetría es el plano 2-3, la matriz de flexibilidad que se obtendrá será:

$$S_{TI} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{2x2} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Normalmente se suele trabajar con la matriz de flexibilidad, ya que sus coeficientes poseen una relación más sencilla con las constantes elásticas que la matriz de rigidez. Por consiguiente, si se sustituye cada coeficiente por las constantes elásticas que representan la matriz en un material transversalmente isótropo quedará:

$$S_{TI} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot \left(\frac{1}{E_2} - \left(-\frac{\nu_{32}}{E_3} \right) \right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

No obstante, si se quisiera trabajar con la matriz de rigidez directamente sin tener que pasar por la matriz de flexibilidad, la relación que ésta guarda con las constantes elásticas es la siguiente:

$$C_{TI} = \begin{bmatrix} \frac{(1 - \nu_{23}^2)E_1}{\Delta} & \frac{\nu_{21}(1 + \nu_{23})E_1}{\Delta} & \frac{\nu_{21}(1 + \nu_{23})E_1}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{21}(1 + \nu_{23})E_1}{\Delta} & \frac{(1 - \nu_{12}\nu_{21})E_2}{\Delta} & \frac{(\nu_{23} + \nu_{12}\nu_{21})E_2}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{21}(1 + \nu_{23})E_1}{\Delta} & \frac{(\nu_{23} + \nu_{12}\nu_{21})E_2}{\Delta} & \frac{(1 - \nu_{12}\nu_{21})E_2}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1 - \nu_{23} - 2\nu_{12}\nu_{21})E_2}{2\Delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Siendo $\Delta = 1 - 2\nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}^2 - 2\nu_{21}\nu_{23}\nu_{12}$. Como se puede observar, en el caso de tener un material transversalmente isótropo solo se tiene 5 constantes elásticas independientes: $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}, G_{12}$.

3.2. Análisis Dinámico Explícito

La realización de un análisis dinámico explícito permite estimar la respuesta dinámica de un componente a causa de la propagación de la tensión por el material debida, por ejemplo, a un impacto, es decir, un cambio importante en las tensiones en un breve periodo de tiempo.

Normalmente los análisis dinámicos de estas características poseen una no linealidad que puede proceder de los contactos entre objetos, altas deformaciones y/o del propio material. Como más adelante se comentará, estos análisis se caracterizan por su escaso tiempo de simulación. El tiempo de integración es tan pequeño, que si la simulación se prolonga por más de un segundo sería completamente ineficaz y debería emplearse otro tipo de análisis como el análisis dinámico implícito, también denominado transitorio.

El método de integración explícita permite calcular una gran cantidad de incrementos de tiempo o *time step* en muy poco tiempo (poco tiempo en relación a la cantidad de cálculos que realiza, pero puede durar horas, días e incluso semanas). Por otra parte, en estos análisis se debe prestar especial atención al tiempo total de ejecución, ya que este método de integración necesita que los *time step* sean del orden de microsegundos. Por tanto, el tiempo de análisis será un parámetro clave que determinará la cantidad de tiempo que necesita el programa para poder resolver el análisis.

El problema dinámico transitorio en su forma discreta se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$[M]\{\ddot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = \{F\} \quad (8)$$

Donde $[M]$ representa la matriz de masa, $[C]$ representa la matriz de amortiguamiento, $[K]$ representa la matriz de rigidez, $\{\ddot{D}\}$, $\{\dot{D}\}$ y $\{D\}$ representan respectivamente la aceleración, velocidad y desplazamiento nodal.

El método explícito, a diferencia del implícito, para calcular la aceleración, velocidad y desplazamiento de los nodos solo necesita la información del ciclo de tiempo anterior. El método se caracteriza por mitades de *time step*:

$$\ddot{D}_n = \frac{D_{n+\frac{1}{2}} - D_{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \quad (9)$$

$$D_{n+\frac{1}{2}} = \frac{D_{n+1} - D_n}{\Delta t} \quad (10)$$

Donde D_n , \dot{D}_n y \ddot{D}_n son el desplazamiento, velocidad y aceleración en un instante de tiempo t_n , respectivamente. Por tanto, $\Delta t = t_{n+1} - t_n$. Si reordenamos las ecuaciones (9) y (10) para poder obtener de ellas la velocidad y el desplazamiento en función de D_n , $D_{n-\frac{1}{2}}$ y \ddot{D}_n , se conseguirá necesitar únicamente la información del ciclo pasado.

$$D_{n+\frac{1}{2}} = D_{n-\frac{1}{2}} + \dot{D}_n \Delta t \quad (11)$$

$$D_{n+1} = D_n + D_{n+\frac{1}{2}} \Delta t \quad (12)$$

De esta forma, el análisis empezaría con la posición y velocidad inicial (condiciones iniciales de nuestro modelo), con esta información se calcularía las deformaciones. Una vez se ha calculado las deformaciones, se comprobará el cambio de volumen en los elementos y se calculará las densidades de nuevo. Una vez se ha recalculado la densidad, se pasará a la obtención de las tensiones. De esta forma, sumando las cargas externas (como fuerzas en los nodos) y las tensiones integradas en los elementos permitirá la obtención de la aceleración:

$$\ddot{D}_n = \frac{F_n}{m} + \frac{b}{\rho} \quad (13)$$

Donde F_n es la fuerza en los nodos, m es la masa del elemento, b es la fuerza volumétrica y ρ la densidad.

Una vez se ha obtenido la aceleración, mediante la ecuación (11) se obtiene la velocidad en $n + \frac{1}{2}$, y con la velocidad y la ecuación (12) se obtiene el desplazamiento en $n + 1$.

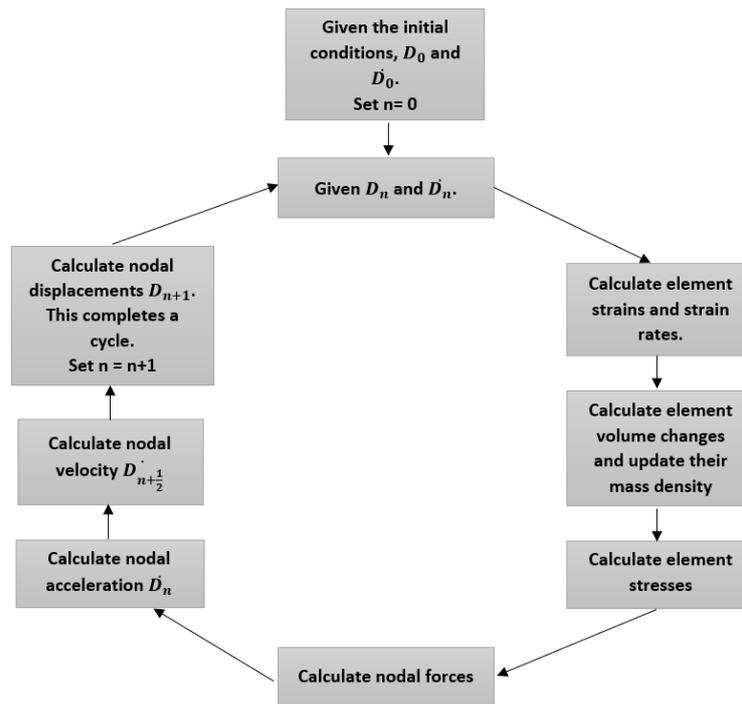


Figura 3. Ciclo análisis explícito.³

4. GENERACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DEL CONJUNTO CABEZA-CASCO

4.1. Modelos anatómicos de cabeza hombre/mujer

4.1.1. Obtención de la geometría mediante interfaz libre de generación de modelos virtuales.

Para poder realizar los análisis numéricos de impacto a baja velocidad y ser capaces de comparar los efectos que éstos producen es indispensable la generación de cabezas humanas femeninas y masculinas; además de esto, también se debía poder controlar los parámetros anatómicos más representativos de la cabeza, como los comentados en el apartado 2.1.3.

Con el objetivo de conseguir todas estas características se ha hecho uso de una herramienta publica de generación de la geometría de las cabezas humanas, exportables en ficheros con formato stl. Esta herramienta se puede encontrar en: <http://humanshape.org/head/>.

³ H, Huei (2012). Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14. SDC Publications

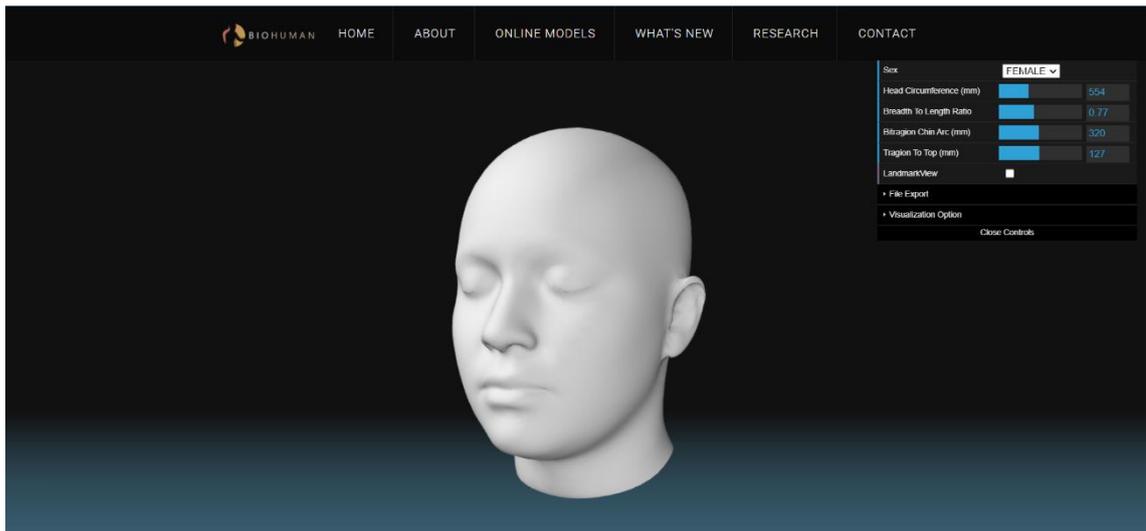


Figura 4. Página de generación de cabezas humanas.

Una de las principales razones para la elección de esta herramienta online de interacción para la creación de las cabezas, es el uso que ha tenido en otros estudios como (Byoung-Keon D. Park, 2020).

Se puede controlar tanto el sexo como parámetros morfométricos característicos a la hora de definir una cabeza. No obstante, aunque no contiene todos los parámetros que se han comentado en el apartado 2.3.1, con los parámetros que el programa permite escoger es suficiente para generar una extensa variedad de cabezas.

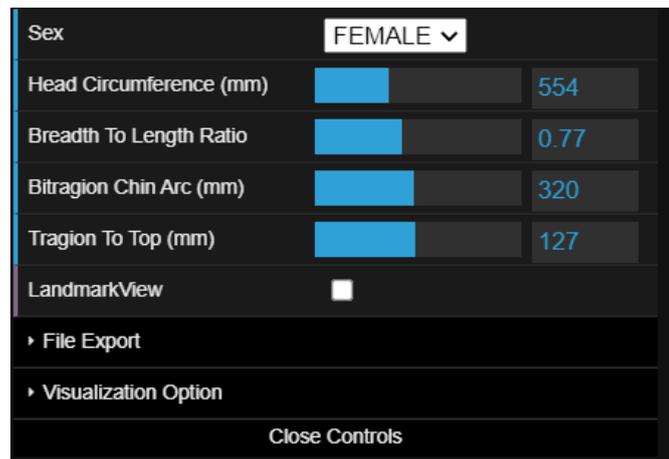


Figura 5. Parámetros morfométricos del generador de cabeza humana.

Como se aprecia en la Figura 5, se pueden variar los siguientes parámetros: *Head Circumference*, *Breadth To Length Ratio*, *Bitrignon Chin Arc* y *Trignon To Top*. Cabe destacar que la interfaz denomina *Trignon To Top* al término *Trignon on top of the head* definido en la Figura 2c y añade un parámetro denominado *Breadth To Length Ratio*. Se basa en una relación entre el parámetro *Head length* y el parámetro *Face width*, de forma que estas características de la cabeza mantengan una proporción entre sí y no puedan formar geometrías irreales.

Por último, también se puede activar y desactivar la visualización de los *Landmarkers* en la geometría de la cabeza y así poder ver la relación entre ellos y las variables que se desean controlar.



Figura 6. Landmarkers definidos por el programa de generación de cabezas.

4.1.2. Características de los modelos hombre/mujer seleccionados

Para poder escoger de forma adecuada las diferentes cabezas que más tarde se van a analizar en una simulación numérica de impacto, se estableció un crecimiento gradual para los distintos parámetros morfométricos a controlar en el generador de geometrías, a excepción de *Bread to Length Ratio*, que se determinó para poder crear una forma realista de la cabeza. De esta manera, se podía asegurar que las formas anatómicas analizadas eran lo más representativas posible.

No obstante, el buscar que las cabezas fueran realistas y comunes no ha implicado una baja variación de las variables morfométricas. Tanto el parámetro *Head Circumference*, *Bitrignon Chin Arc* y *Trignon to Top* se han ajustado desde el valor más pequeño que permitía la aplicación hasta el más grande (el parámetro *Trignon to Top*

no ha llegado al máximo valor para evitar excesivas deformaciones, alejadas de la realidad).

Por otra parte, se ha buscado poder realizar una comparación directa entre las cabezas humanas de hombres y mujeres. Por ello, se debían escoger para ambos sexos los mismos valores. De esta forma se podría comparar si, efectivamente, se produce un cambio significativo en la respuesta del sistema cabeza-caso como consecuencia de una diferencia de género. Este estudio, puede contribuir a poner de manifiesto la necesidad de personalizar y diferenciar los elementos de protección de la cabeza.

Teniendo en cuenta todas estas características expuestas y buscando poder realizar la comparación de una forma eficiente, las medidas utilizadas para la generación de cabezas humanas han sido recogidas en la siguiente tabla:

	HOMBRE			MUJER		
	P	M	G	P	M	G
<i>Head Circunfererence [mm]</i>	500	570	650	500	570	650
<i>Breadth to Length Ratio</i>	0.6	0.8	0.9	0.6	0.8	0.9
<i>Bitracion Chin Arc [mm]</i>	265	325	380	265	325	380
<i>Tragion to Top [mm]</i>	110	120	130	110	120	130

Tabla 1. Medidas características para la generación de modelos numéricos; (P) pequeña, (M) mediana, (G) grande.

HOMBRE

MUJER

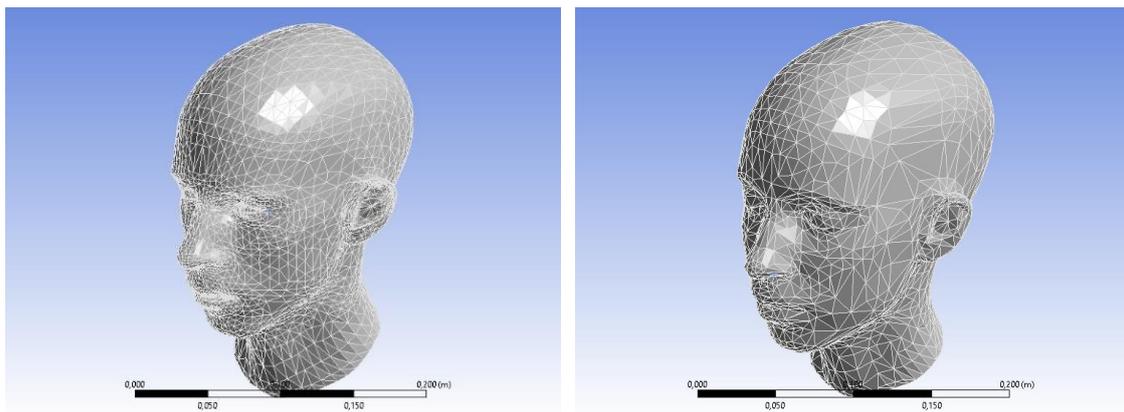


Figura 7. Modelos de cabeza pequeña de hombre y mujer.

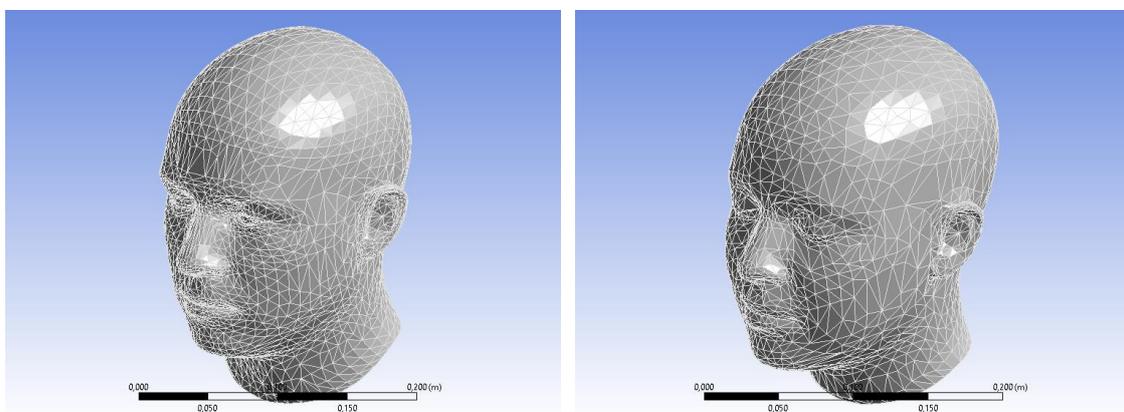


Figura 8. Modelos de cabeza mediana de hombre y mujer.

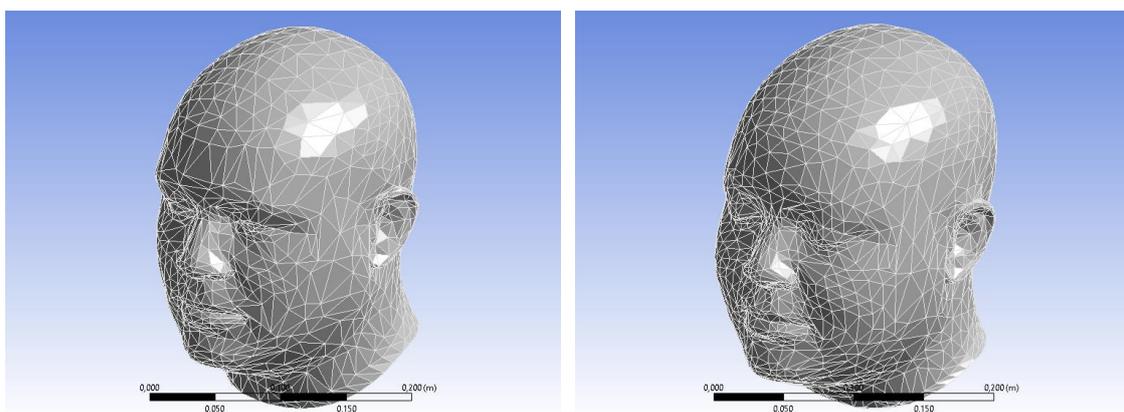


Figura 9. Modelos de cabeza grande de hombre y mujer.

4.2. Generación de los modelos numéricos de cabeza con Ansys Workbench

4.2.1. Tratamiento geométrico

La geometría de la cabeza obtenida mediante la aplicación online que se comentó en el apartado 4.1.1. es una geometría muy realista, formada por miles de pequeñas superficies que unidas dan la forma a la cabeza. Al utilizar el método de generación de pequeñas superficies se consigue una muy buena geometría, pero, por otro lado, al unir las superficies entre si se generan ángulos excesivamente pequeños. A estos ángulos tan pequeños que se forman entre superficies se les denomina protrusiones.

Cuando hablamos de conseguir una geometría de objetos compleja, como por ejemplo la geometría de una cabeza humana, donde definir partes como los ojos, orejas y nariz puede ser muy complicado, es muy útil la utilización de pequeñas superficies que formen al unirse la forma final. En consecuencia, se generan una gran cantidad de protrusiones (ver Figura 10).

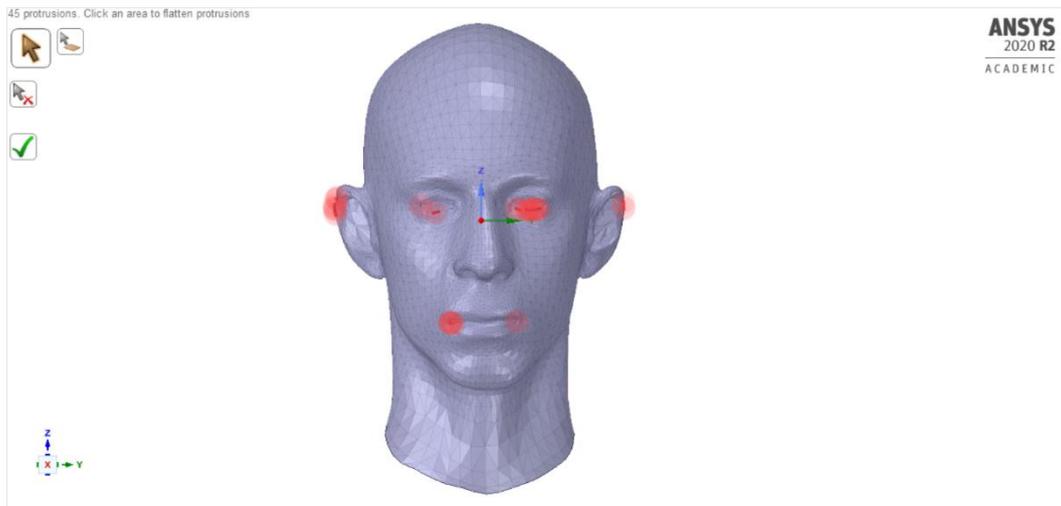


Figura 10. Geometría con protrusiones. Modelo de cabeza de hombre pequeña.

Sin embargo, cuando se tiene que hacer un análisis por elementos finitos, las protrusiones suponen una dificultad adicional, ya que una de las características principales a la hora de realizar este análisis numérico es la generación de la malla. Por tanto, para que la geometría pueda ser mallada de una forma correcta se debían eliminar todas las protrusiones.

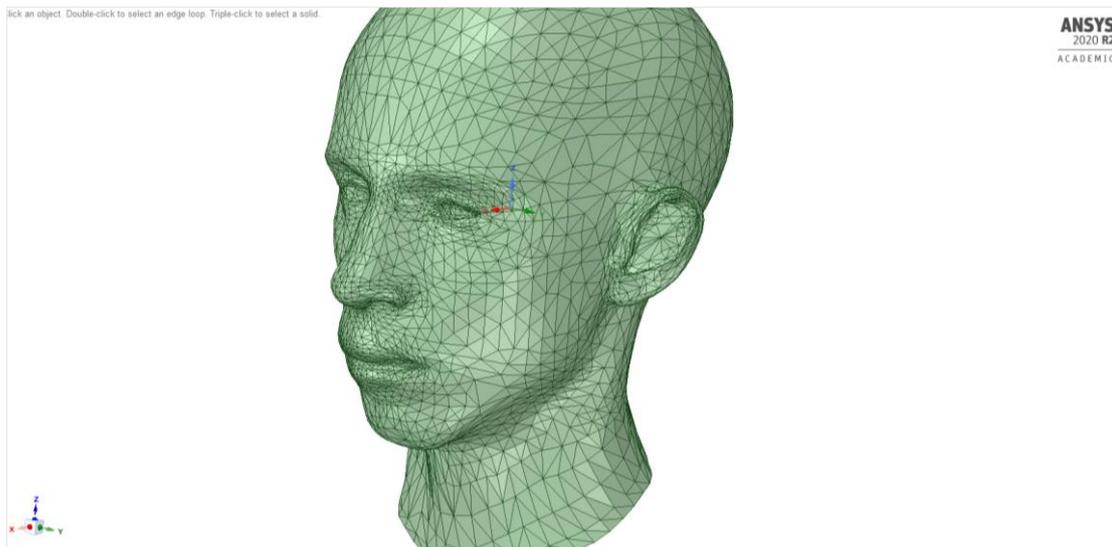


Figura 11. Geometría sin protusiones. Modelo de cabeza de hombre pequeña.

Por último, la cabeza humana generada en la página <http://humanshape.org/head/> proporciona superficies, por lo tanto, se debía convertir la superficie con forma de cabeza en un sólido no hueco.

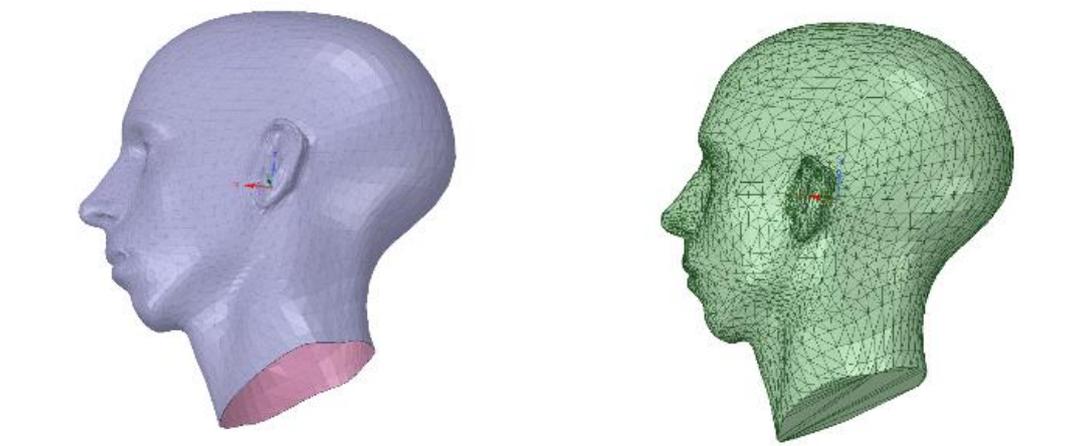


Figura 12. Transformación de superficie (izquierda) a sólido (derecha). Modelo de cabeza de hombre pequeña.

4.2.2. Definición del material

En los análisis efectuados se han utilizado tres tipos diferentes de materiales, uno para el casco, otro para la cabeza y un último para el impactador.

Para el caso de la cabeza se ha escogido una aleación de magnesio que se utiliza actualmente como elemento *dummy* en las pruebas de impacto en cascos de protección. El material en concreto se llama *Magnesium K1A*. El material cumple con los requisitos expuestos en las normativas de ISO/DIS 6220 y EN960. Las propiedades mecánicas

más importante de este material son su Módulo de Young (E) de 44,8GPa y su coeficiente de Poisson (ν) de 0,3.

Para el casco de protección se va a utilizar una configuración tipo sándwich. Sus propiedades elásticas se obtienen por homogeneización (se verá más en detalle en el apartado 4.3.2), considerando que la estructura es piel + núcleo + piel. Dado que el *solver explicit dynamics* de Ansys Workbench admite únicamente la definición de materiales isotrópicos, se considerará las propiedades elásticas en la dirección de la carga únicamente. Esta hipótesis es consistente con el hecho de que la carga se transmitirá a través de una configuración de muelles en serie desde la zona de impacto hasta la base del cuello.

Por tanto, se asumirá que las propiedades aparentes del casco formado por dos capas de piel de fibra de carbono con epoxi y un núcleo de polietileno, son: módulo de Young (E) de 4.062GPa y coeficiente de Poisson (ν) de 0.064.

4.2.3. Generación del modelo del impactador

El impactador, según la norma EN-397 que regula las características de los ensayos y homologación de cascos debe tener una masa de 5 kg. La parte hemisférica del impactador será de radio 50 mm. El material escogido ha sido el acero estructural, material definido en la base de datos de propiedades de Ansys Workbench, con un módulo de Young (E) 200 GPa y un coeficiente de Poisson (ν) de 0.3.

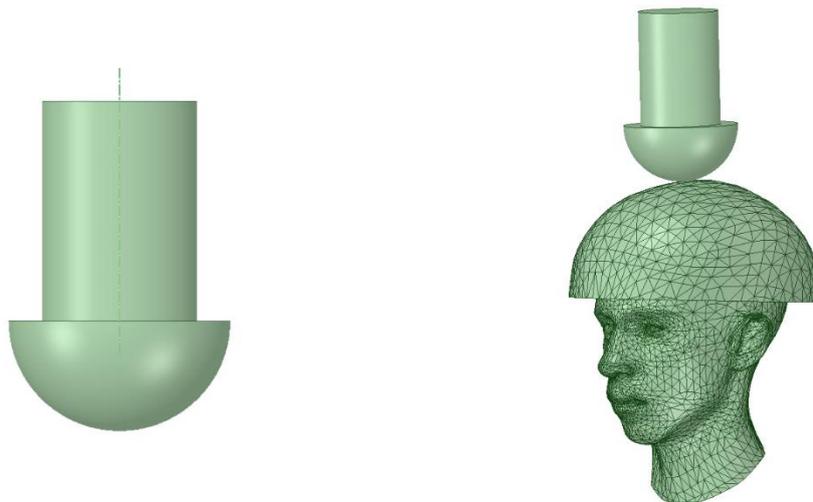


Figura 13. Geometría del impactador de masa 5Kg (izquierda). Modelo completo (derecha).

Por otro lado, se ha diseñado un impactador compuesto por una semiesfera de radio 50 mm y un cilindro en la base de la semiesfera formado por un radio de 70 mm y una altura de 100 mm (ver Figura 13).

4.3. Generación del modelo del casco de protección

4.3.1. Hipótesis 1: Modelo de casco basado en escalado

Para que un casco de protección de motocicletas y ciclomotores sea homologado y por tanto, pueda venderse en España legalmente, necesita pasar una cantidad de test y pruebas que acrediten que puede resistir a múltiples situaciones como por ejemplo no llegar a unas aceleraciones determinadas y que el objeto no traspase el caso.

El análisis que se abordará en el presente Trabajo Fin de Grado será el impacto coronal, siendo éste el impacto más crítico que se puede sufrir, debido a que repercute no solo de forma crítica a la cabeza, sino que también afecta severamente al cuello.

Por este motivo, el parámetro más significativo a la hora de realizar un ensayo del impacto coronal es la distancia que hay entre el punto de impacto sobre el casco y el punto Bregma de la cabeza.

Gracias a esta hipótesis, la realización del casco de protección mediante un escalado de la parte superior de la cabeza humana se puede considerar una muy buena aproximación. Para los cascos que se han analizado se ha escogido un escalado de 1.3, mediante el cual conseguimos un grosor en la parte superior de alrededor de 25 mm.

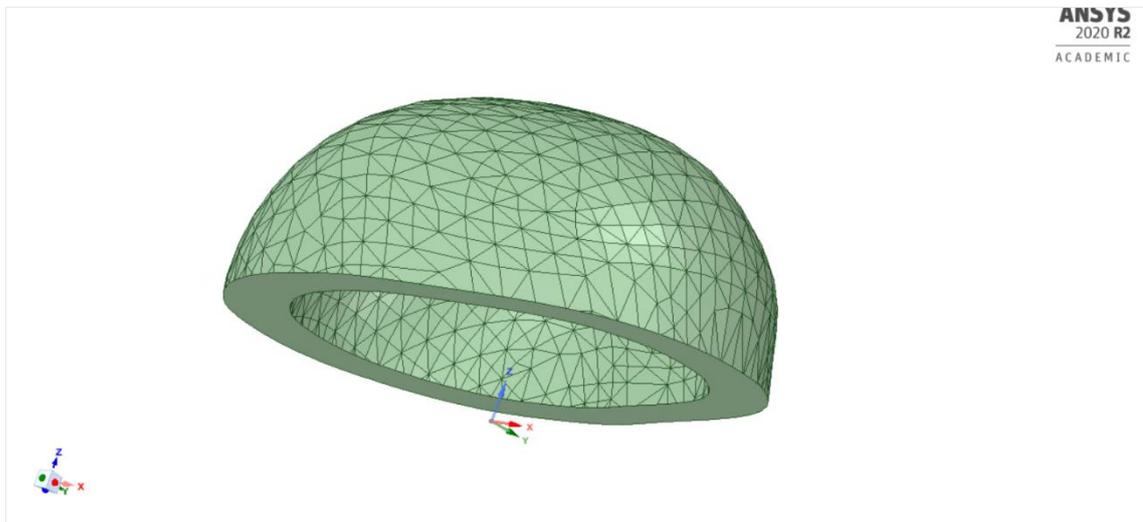


Figura 14. Modelo geométrico del casco de protección.

4.3.2. Hipótesis 2: Modelado del material empleando homogeneización numérica

A nivel macroscópico el conjunto piel + núcleo + piel se comporta como un material ortótropo y en nuestro caso en particular, la dirección de aplicación de la carga está contenida en uno de los planos de simetría del material, por lo tanto, previsiblemente su comportamiento será ortótropo, como se comentó en el apartado 3.1.2. Como consecuencia, se evitarán los acoplamientos entre las tensiones tangenciales y las deformaciones normales, así como el acoplamiento entre las tensiones normales y las deformaciones angulares.

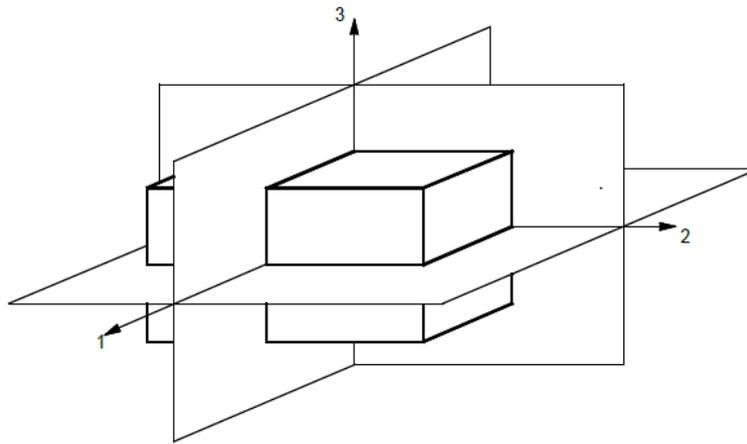


Figura 15. Planos de simetría en un material ortótropo.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento elástico-lineal de nuestro material compuesto reforzado con tejido de fibra larga y equilibrado, se utilizará la Ley de Hooke Generalizada para el caso de material ortótropo con los ejes orientados de tal forma que se tenga la relación entre tensiones y deformaciones del conjunto piel + núcleo + piel. En la ecuación (14), se puede ver la ley de Hooke Generalizada para nuestro caso de material ortótropo:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

Donde σ representa el vector de tensiones en un punto, ε representa el vector de deformaciones en un punto y \mathbf{C} la matriz de rigidez del material. Como para nuestro

caso particular los ejes del sistema de referencia 1-2-3 coinciden con los cartesianos del modelo, se puede sustituir en la ecuación (14) de forma que se obtenga:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Para poder relacionar los desplazamientos que sufre un punto del material con las deformaciones generadas, se deben considerar las ecuaciones de compatibilidad correspondientes:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (16)$$

$$\varepsilon_y = \frac{dv}{dy} \quad (17)$$

$$\varepsilon_z = \frac{dw}{dz} \quad (18)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy} \quad (19)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx} \quad (20)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \quad (21)$$

Cabe destacar, que u , v y w hacen referencia respectivamente al desplazamiento en la dirección x , y y z .

Para poder calcular los términos de la matriz de rigidez $[C]$ se va a utilizar un proceso de homogeneización numérica. Este proceso consiste en la resolución de 6 casos de carga, donde en cada uno se le aplicara una deformación unitaria independiente de entre las 6 componentes del vector de deformaciones $\{\varepsilon\}$. No obstante, para cada caso

de carga también hay que asegurarse de que solo se está produciendo la deformación deseada y el resto de las 5 componentes son cero.

Casos de carga	Vectores de deformaciones					
	ε_x	ε_y	ε_z	γ_{yz}	γ_{xz}	γ_{xy}
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabla 2. Casos de carga para la estimación de la matriz de rigidez del material por homogeneización numérica.

Los casos de carga se aplican sobre un volumen elemental representativo de nuestro componente, el casco, manteniendo las condiciones de contorno de periodicidad en las fronteras de nuestro dominio.

Para cada uno de los 6 casos van a aparecer unas fuerzas resultantes, las cuales serán las necesarias para conseguir el estado de equilibrio estático. De esta forma, sabiendo la deformación que se tiene y viendo las tensiones generadas se puede ir obteniendo cada una de las seis columnas de la matriz de rigidez del material.

Para el primer caso, aplicando una deformación unitaria en la dirección x y manteniendo todas las deformaciones restantes en 0 se obtiene la deformada mostrada en la Figura 16. Con las fuerzas resultantes en las caras del volumen representativo, se calcula la primera columna de la matriz de rigidez C_{11}, C_{21}, C_{31} .

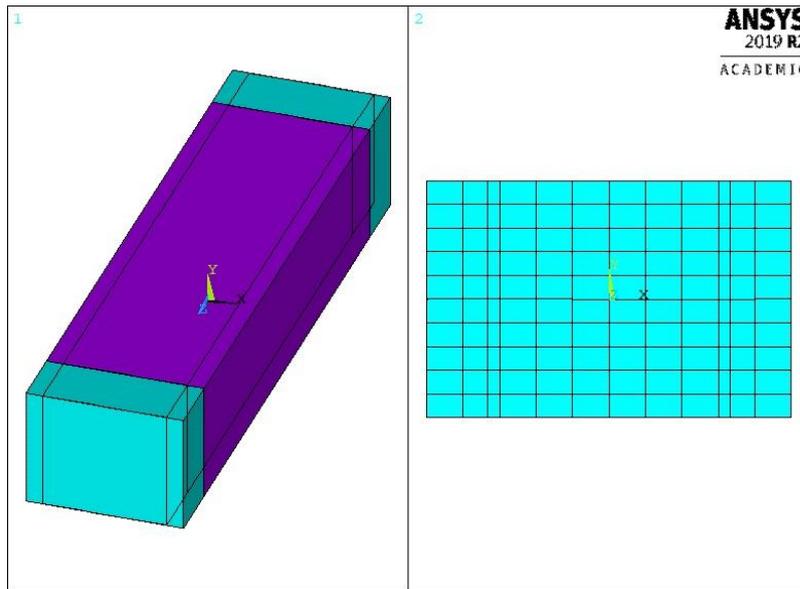


Figura 16. Deformación normal unitaria en la dirección x.

Para el segundo caso, aplicando una deformación normal unitaria en la dirección y, y manteniendo todas las deformaciones restantes en cero se obtiene la deformada mostrada en la Figura 17. Con las fuerzas resultantes en las caras del volumen representativo, se calcula la segunda columna de la matriz de rigidez C_{12}, C_{22}, C_{32}

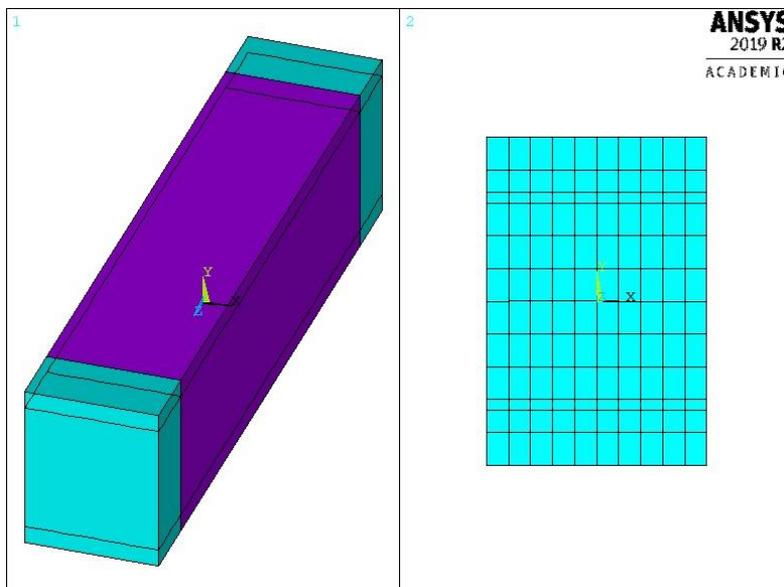


Figura 17. Deformación normal unitaria en la dirección y.

Para el tercer caso, aplicando una deformación normal unitaria en la dirección z y manteniendo todas las deformaciones restantes en cero se obtiene la deformada mostrada en la Figura 18. Con las fuerzas resultantes en las caras del volumen representativo, se calcula la tercera columna de la matriz de rigidez C_{13}, C_{23}, C_{33}

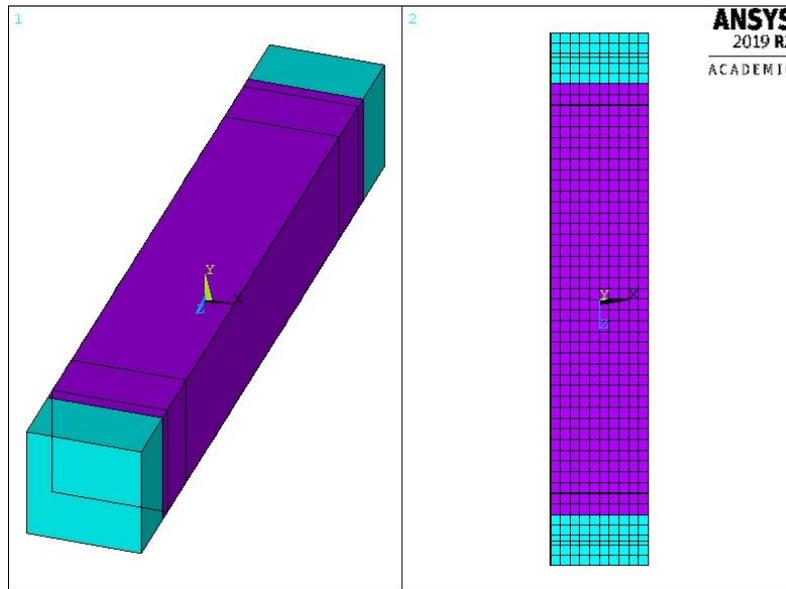


Figura 18. Deformación normal unitaria en la dirección z.

Para el cuarto caso y siguiendo la notación habitual en la disciplina de materiales compuestos, en la cual el orden establecido para el vector de deformaciones angulares es yz, xz y xy, se va a aplicar una deformación angular unitaria en el plano yz y se va a mantener todas las deformaciones restantes en cero, de este modo de obtendrá la deformada mostrada en la Figura 19. Con las fuerzas resultantes en las caras del volumen representativo, se calcula la cuarta columna de la matriz de rigidez, que, al tratarse de un material ortótropo será simplemente el término C_{44} .

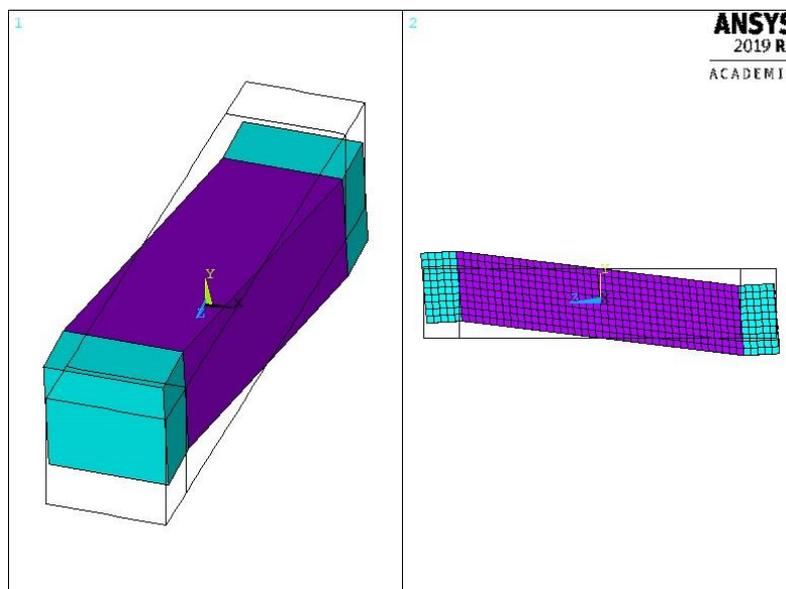


Figura 19. Deformación angular unitaria en el plano yz.

Para el quinto caso, aplicando una deformación angular unitaria en el plano xz y manteniendo todas las deformaciones restantes en cero se obtiene la deformada mostrada en la Figura 20. Mediante el cálculo de la resultante de fuerzas en las caras

del volumen representativo, se podrá calcular el valor del término de la matriz de rigidez C_{55} .

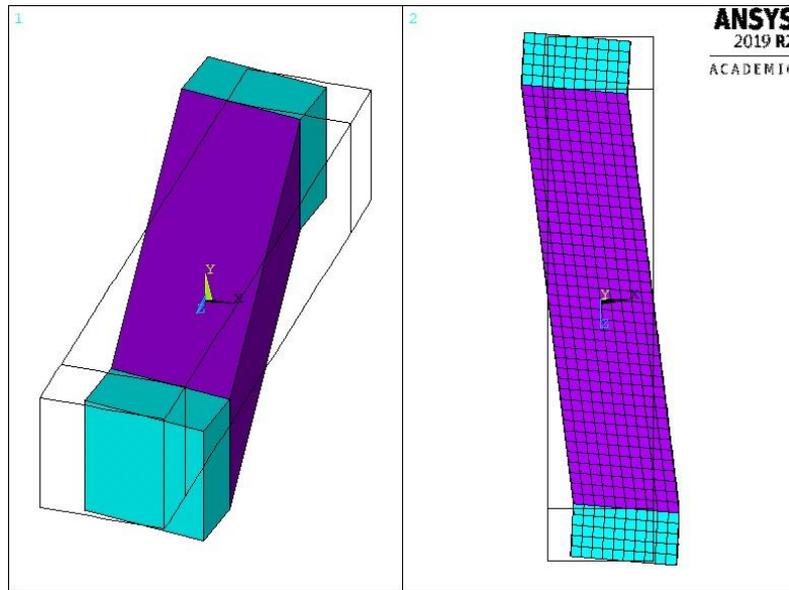


Figura 20. Deformación angular unitaria en el plano xz.

Para el sexto caso y último, se va a aplicar una deformación angular unitaria en el plano xy y manteniendo todas las deformaciones restantes en cero. Se obtiene la deformada mostrada en la Figura 21 y, nuevamente, partir de la resultante de fuerzas en las caras se podrá calcular el valor del término de la matriz de rigidez C_{66} .

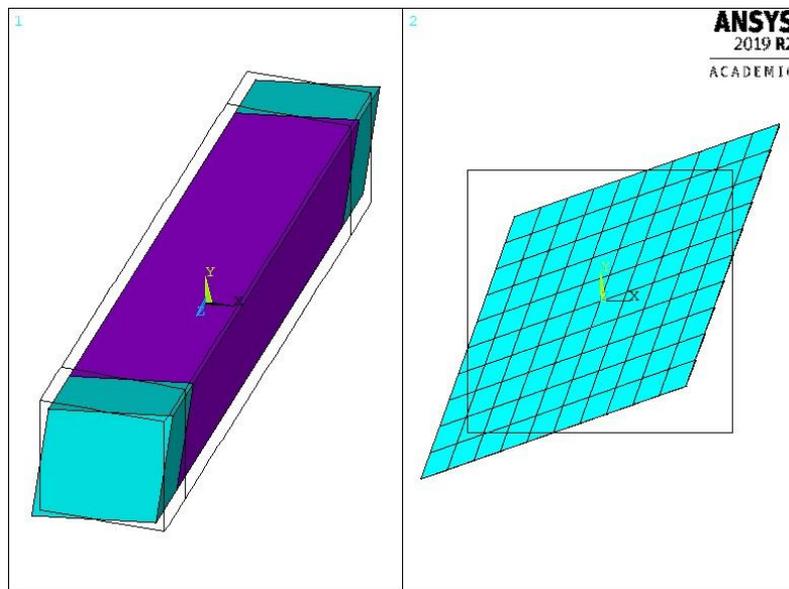


Figura 21. Deformación angular unitaria en el plano xy.

La matriz de rigidez debe ser simétrica y los coeficientes de influencia mutua y de Chentsov deben ser despreciables. Esta es una comprobación importante que debe cumplir el proceso de homogeneización aplicado a nuestro componente.

4.4. Generación del modelo del conjunto cabeza-caso

4.4.1. Hipótesis 3: Conformidad de malla

Como se ha comentado anteriormente, cuando se trabaja con elementos finitos una de las principales características que hay que tener en consideración y dedicarle una considerable parte del tiempo es el mallado, ya que hay múltiples opciones a la hora de generar la malla.

En nuestro caso se realizará la simulación numérica de un impacto coronal centrado a baja velocidad y, por lo tanto, se puede considerar que el desplazamiento del casco sobre la cabeza es despreciable, por lo tanto, se puede considerar como si el casco fuera una continuación de la cabeza.

Por otro lado, gracias a la hipótesis 1 del escalado, comentada en el apartado 4.3.1, se puede asegurar que entre el caso y la cabeza hay continuidad en la malla.

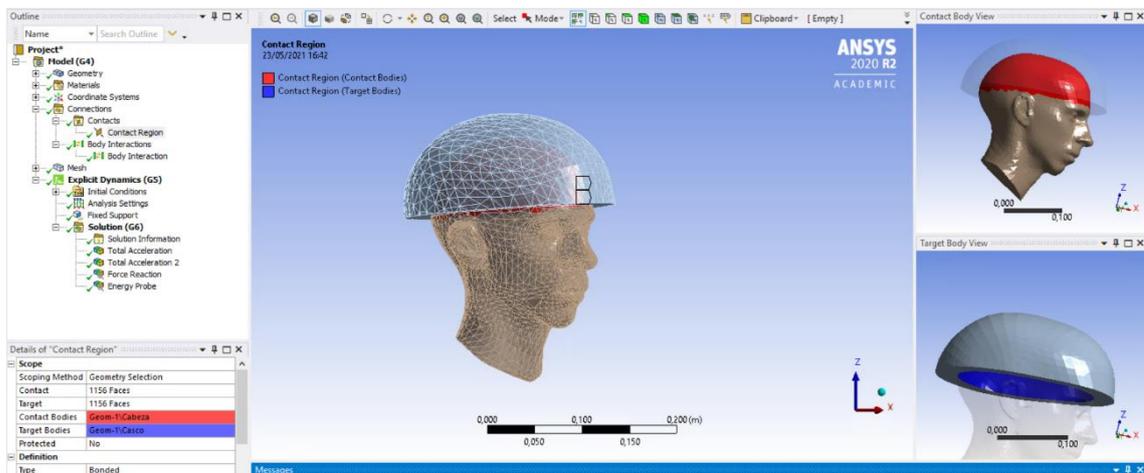


Figura 22. Interacción cabeza-casco.

Para los análisis de impacto en los 6 modelos de cabeza se ha optado por elementos tetraédricos lineales y como máximo tamaño para éstos de 10 mm. No obstante, está activada la opción de *Adaptive Sizing* de forma que en las esquinas o lugares donde la geometría es más irregular y se necesita un tamaño de malla menor, el programa de forma automática modifique el tamaño inicial para adaptarse a la topología del componente.

4.5. Carga y condiciones de restricción

4.5.1. Normativa

La normativa que se va a seguir a la hora de hacer los ensayos y que estos tengan una percusión directa en la industria será la Norma EN397 de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

4.5.2. Control de la velocidad y la posición del impactador

Según la normativa comentada en el anterior punto, el impactador (*striker* y base) debe estar posicionado a una distancia desde el punto de impacto de $1000 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, por lo tanto, siendo éste un problema de movimiento uniformemente acelerado y partiendo de la distancia que se tiene que encontrar el impactador sobre el punto de impacto se obtiene:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (22)$$

Donde el impactador parte de la posición de reposo y por tanto su velocidad inicial es cero y la aceleración es la de la gravedad 9.81 m/s^2 . Por lo tanto, considerando que partimos de una posición inicial de 0 metros y queriendo averiguar cuanto tiempo tarda en llegar a la posición de -1m, se obtiene un tiempo de 0.4515 s segundos.

Una vez obtenido de la ecuación (22) el tiempo que tardará en llegar a la posición objetivo, se sustituye los valores conocidos en la ecuación (23) para determinar la velocidad que tendrá que llevar el impactador a la hora de colisionar con el casco.

$$v = v_0 + at \quad (23)$$

De esta forma se obtiene una velocidad de 4.4294 m/s. Por lo tanto, la velocidad que lleva el impactador en el momento en que entra en contacto con la cabeza es de 4.4 m/s.

4.5.3. Tiempo de integración

Cuando se utiliza el análisis explícito una de las características que hay que tener en cuenta es el tiempo que dura un solo cálculo de todo el tiempo de análisis. Para poder asegurar una buena precisión y estabilidad, este tiempo debe ser lo más pequeño posible.

El matemático alemán Courant, Friedrichs, and Lewy sugirió “*que un solo tiempo de integración, la onda de propagación no debería viajar más allá que el tamaño más pequeño de los elementos*”. De esta forma, la fórmula que establece el tiempo de integración viene dada por:

$$\Delta t = f \frac{h}{c} \quad (24)$$

Donde h es el tamaño más pequeño de los elementos, c es la velocidad de propagación de la onda en el material elástico y f es un factor de seguridad que sirve para asegurar la estabilidad en la solución.

Sin embargo, en los análisis de este Trabajo Fin de Grado el tiempo de integración va a ser controlado de forma automática por el programa de ANSYS Workbench y el factor de seguridad se va a dejar 0.9, que es el valor que tiene ANSYS Workbench por defecto.

4.5.4. Condiciones de restricción

Para poder realizar de forma correcta la simulación de impacto según la Norma EN397, se establece que la base donde se apoya la cabeza debe tener una masa de más de 500 kg de forma que se asegure que ésta no se moverá durante el impacto que dura el impacto y el sistema tendrá la suficiente estabilidad para simular de la forma más realista las consecuencias que tendrá el impacto de la cabeza. De esta forma también se consigue poder obviar la onda compresiva de retorno.

Como se está trabajando con un modelo de elementos finitos, para simular de forma correcta la base de 500 kg y que la estructura tenga una estabilidad absoluta, una de las opciones más indicadas es generar en la base del modelo de la cabeza una restricción de empotramiento. De esta forma, a la hora de simular el impacto, la restricción

consiga representar la continuidad del cuello y la base a la que hace referencia la norma EN397.

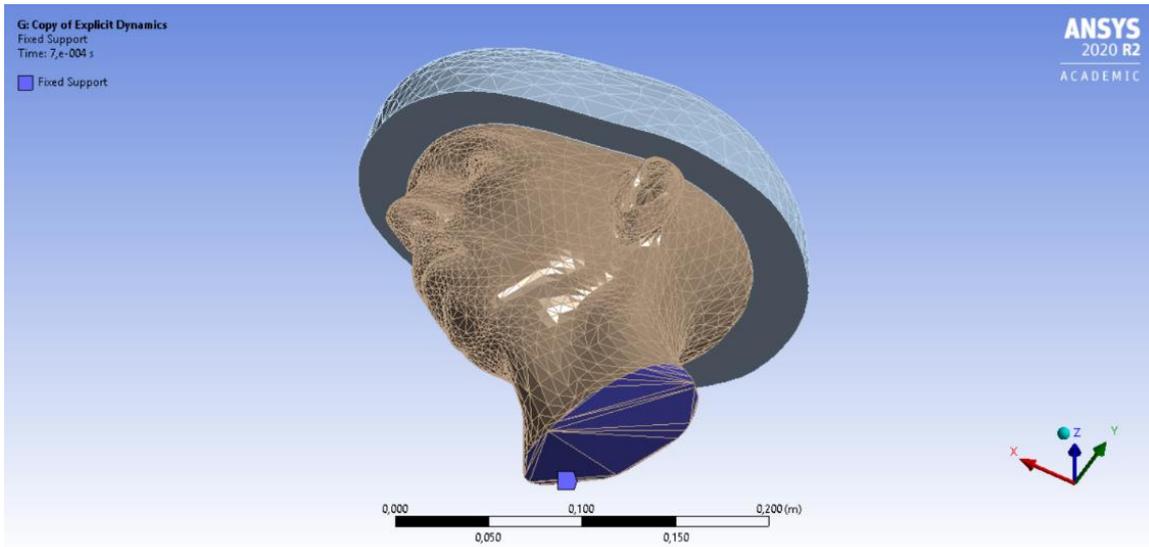
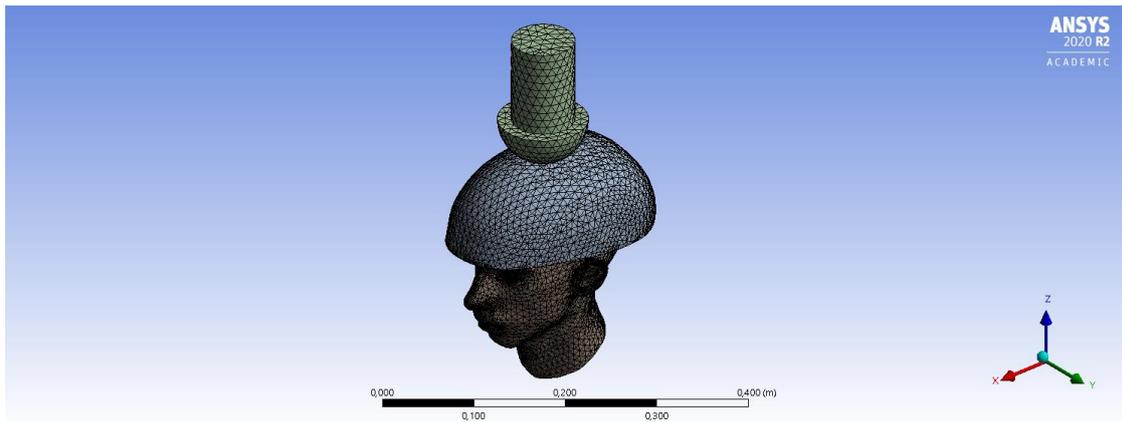


Figura 23. Restricción en la base del modelo de cabeza.

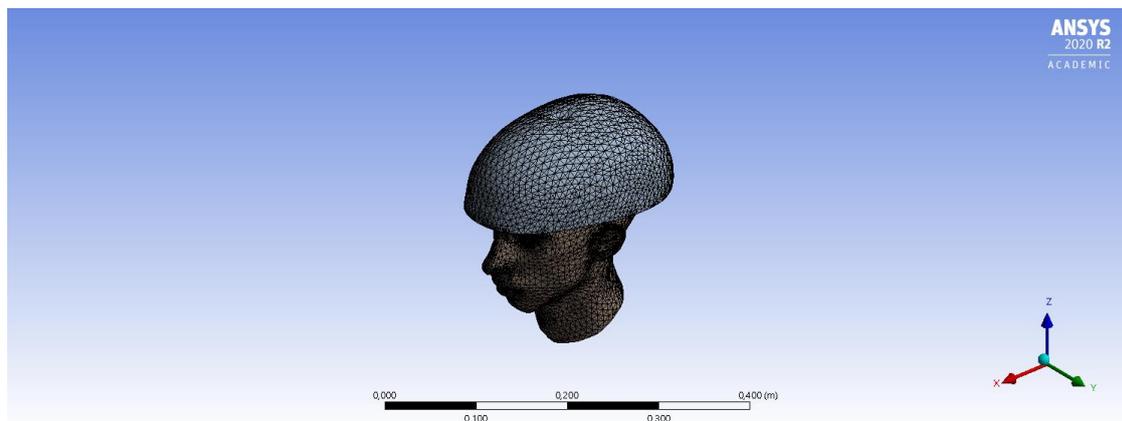
5. RESULTADOS

Para poder sacar conclusiones acerca del efecto que tiene tanto el tamaño de la cabeza como la anatomía propia derivada del sexo del individuo, se va a obtener la fuerza en la base de la cabeza (cuello) como consecuencia del impulso producido y la aceleración resultante en la cabeza humana que puede determinar en gran medida la aparición de lesiones cerebrales aun no habiendo perforación por parte del impactador en el casco.

En la Figura 24 a se muestra una imagen del modelo numérico completo formado por el conjunto cabeza-casco y el impactador en la posición coronal. Asimismo, se muestra una imagen de la deformada que se produce en el elemento de protección tras producirse el impacto (Figura 24 b).



(a)



(b)

Figura 24. Modelo completo: casco, cabeza e impactador (a). Deformación sufrida por el casco tras el impacto (b).

5.1. Análisis de aceleraciones

Uno de los parámetros más cruciales cuando se habla de ensayos de impacto para el casco de una motocicleta es la aceleración que recibe el cráneo. Esta aceleración es medida en el centro de gravedad de la cabeza. A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos para cada uno de los seis modelos de cabeza analizados, tres de hombre y tres de mujer en las tallas P, M y G.

Como se puede apreciar en la Figura 25, la aceleración resultante que experimenta las cabezas humanas de hombres crece cuando el tamaño de las cabezas también lo hace. Se puede observar como el centro de la cabeza pequeña se mantiene por debajo de los 986.92 m/s^2 (100.6 g) y en el modelo mediano, se encuentran prácticamente entre los 891.36 m/s^2 (90.8 g) y los 2674.1 m/s^2 (272.6 g). Cuando se pasa a observar la aceleración resultante sufrida por la cabeza de mayor tamaño en los hombres cerca

del centro de gravedad, se tienen valores entre 793.4 m/s^2 (80.88 g) a 2380.2 m/s^2 (242.6 g).

Para el caso de los modelos de cabeza de mujer mostrada en la Figura 26 se puede observar unos resultados un tanto diferentes. Para la cabeza de mujer pequeña vemos que la aceleración resultante que se tiene cerca del centro de gravedad de la cabeza parte del rango $1539.4 - 2309.1 \text{ m/s}^2$ (156.9 g – 235.4 g) hasta el rango $2309.1 - 3078.8 \text{ m/s}^2$, (235.4 g – 313.84 g) y, al igual que el caso de las cabezas humanas de hombres, la cabeza de tamaño mediano registra una aceleración superior a la de la cabeza pequeña, cuyo rango va desde los 2070 m/s^2 (211 g) hasta los 3450 m/s^2 (351.7 g). No obstante, las aceleraciones que sufre la cabeza grande son inferiores a la cabeza pequeña, donde se observa rangos de aceleración que llegan hasta 1781.8 m/s^2 (181.6 g). Estos resultados se resumen en las Tablas 3 y 4.

	Cabeza Pequeña [m/s^2]	Cabeza Mediana [m/s^2]	Cabeza Grande [m/s^2]
Hombre	≤ 986.92	[891.36 - 2674.1]	[793.4 – 2380.2]
Mujer	[1539.4 – 3078.8]	[2070 - 3450]	≤ 1781.8

Tabla 3. Rango de aceleraciones sufridas por las 6 cabezas (SI).

Normalmente, en el ámbito de los test de impacto para cascos de motocicletas, cuando tratamos con valores de aceleración no se suele hablar en unidades del Sistema Internacional. Para estos ámbitos, habitualmente la aceleración se expresa en términos de la aceleración de la gravedad terrestre ($g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$), por lo tanto, la tabla 3 quedaría de la siguiente forma:

	Cabeza Pequeña [g]	Cabeza Mediana [g]	Cabeza Grande [g]
Hombre	≤ 100.6	[90.8 – 272.6]	[80.88 – 242.6]
Mujer	[156.9 – 313.84]	[211 – 351.7]	≤ 181.6

Tabla 4. Rango de aceleraciones sufridas por las 6 cabezas (g).

Aceleración medida en los modelos de CABEZA DE HOMBRE

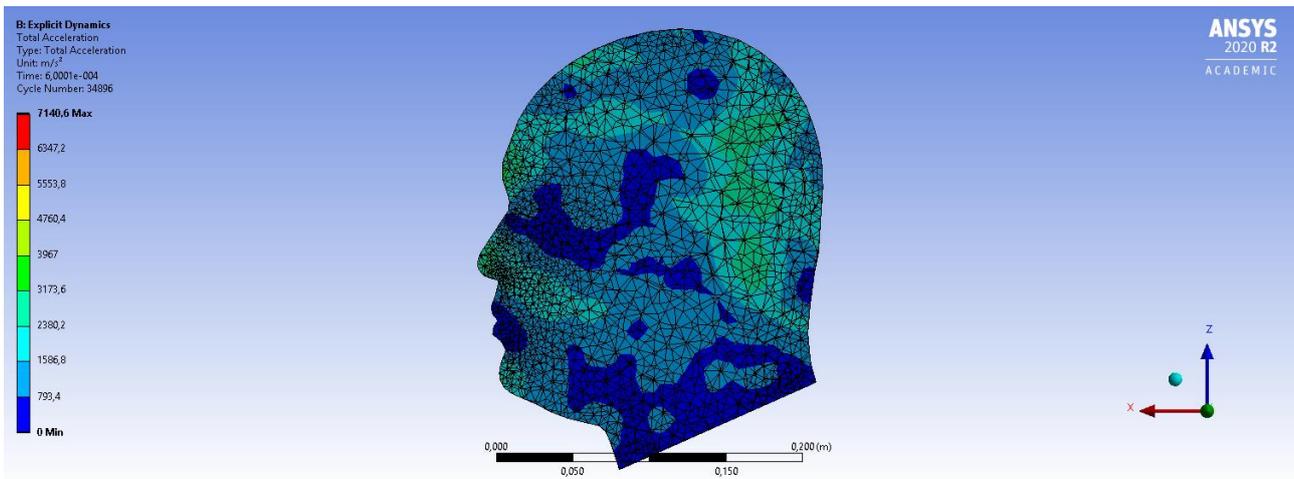
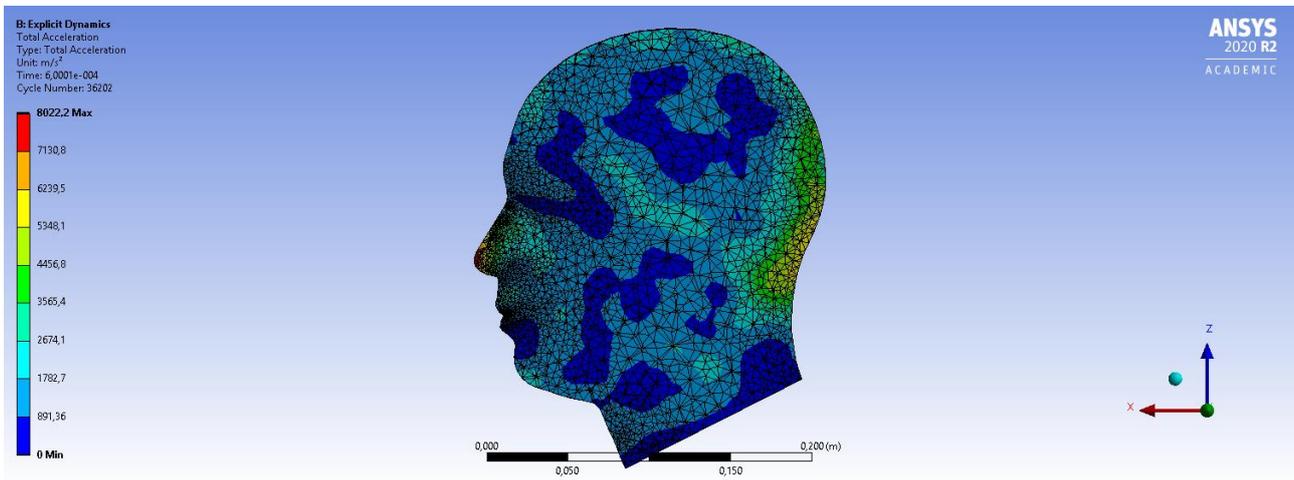
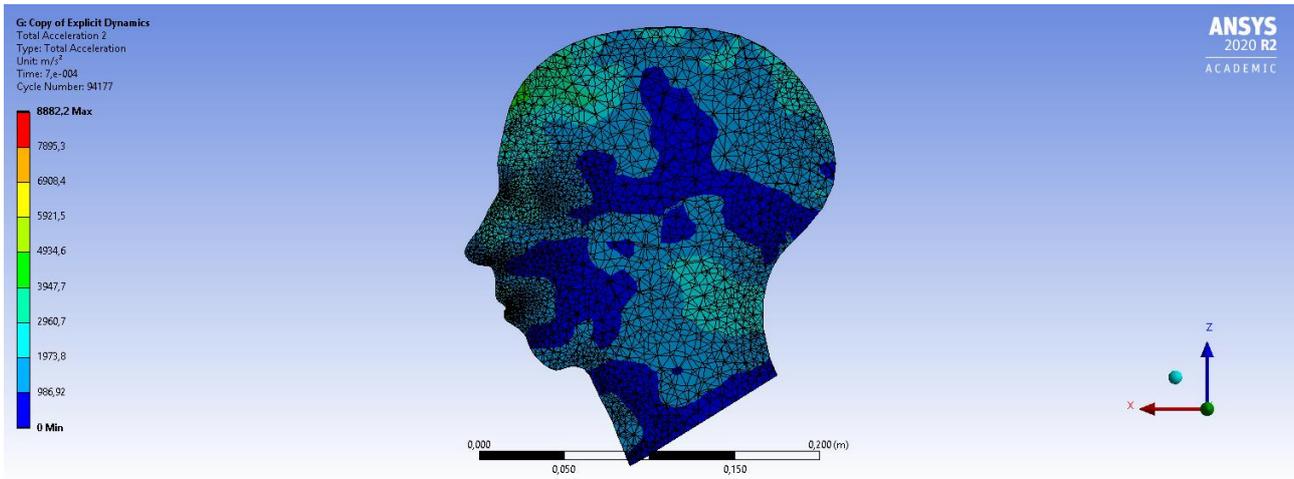


Figura 25. Aceleración en los 3 modelos de cabeza masculina.

Aceleración medida en los modelos de CABEZA DE MUJER

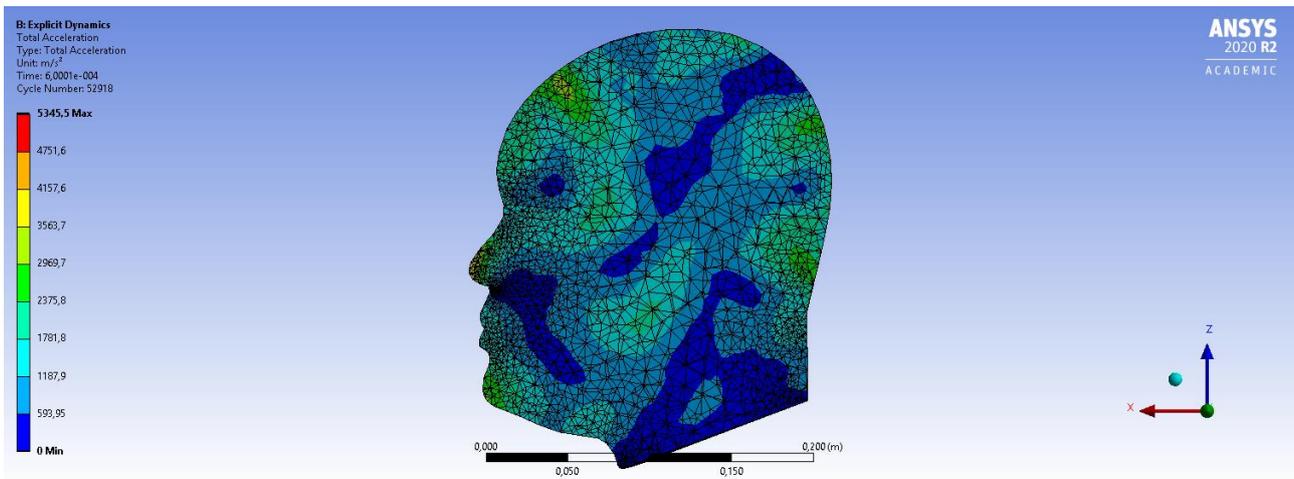
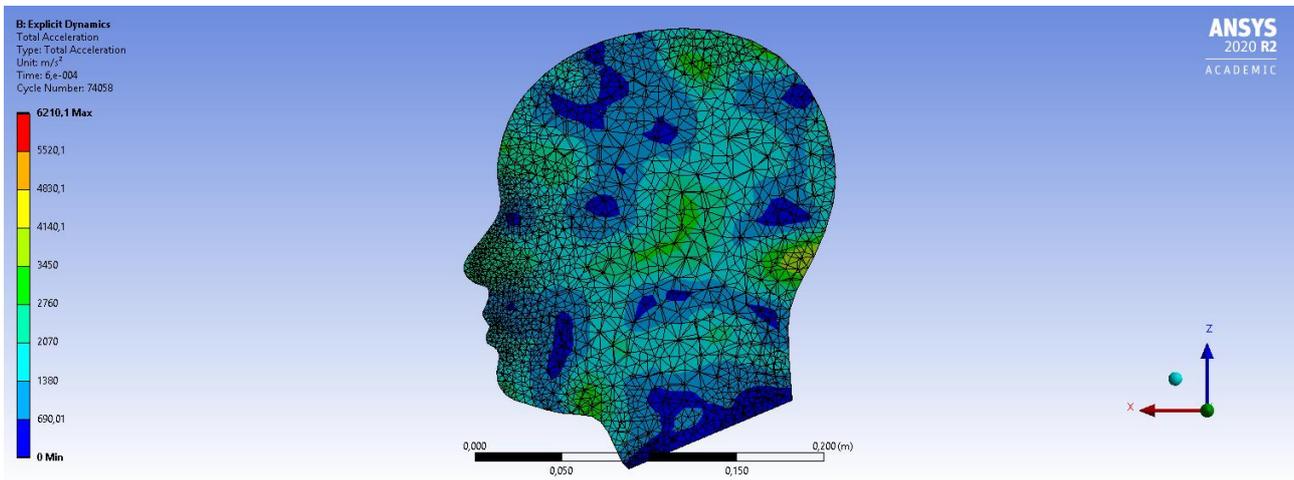
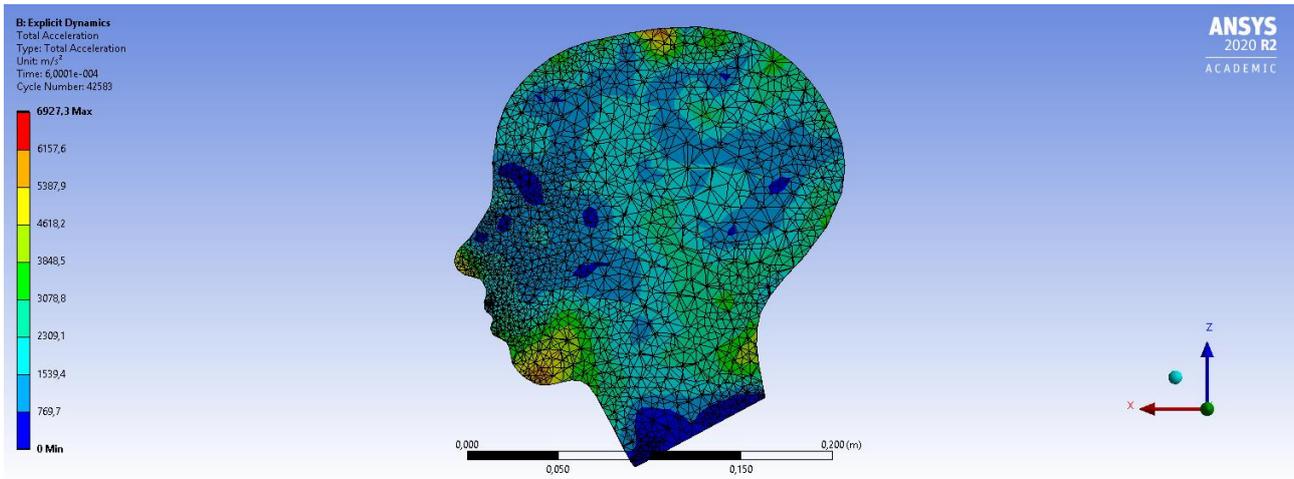


Figura 26. Aceleración en los 3 modelos de cabeza femenina.

5.2. Análisis de fuerzas

A la hora de calcular las fuerzas sufridas por la cabeza, se ha postprocesado el resultado obtenido mediante el cálculo por elementos finitos. La resultante de fuerzas en la base del cuello que obtenemos de Ansys, es decir, la fuerza de reacción, está relacionada con la fuerza debida al impulso elástico ejercido por el impactador y que viene dada por la siguiente expresión:

$$F = \frac{mv}{\Delta t} \quad (25)$$

Donde m es la masa del objeto, v es la velocidad y Δt es la cantidad de tiempo que dura ese incremento dentro del análisis. Esta expresión proviene de la ecuación de movimiento de Newton y de ella se desprende que el impulso es igual a la cantidad de movimiento:

$$F\Delta t = mv \quad (26)$$

Para poder evaluar la fuerza que experimenta la cabeza, necesitamos la aceleración que posee el centro de gravedad de la cabeza, la densidad del material definido para el modelo numérico y su volumen. Para conocer el volumen de la cabeza se ha recurrido a la información sobre la geometría que ofrece el programa ANSYS. Por último, para realizar el cálculo se ha utilizado la ecuación del movimiento dada por (27).

$$F_i = \rho V a_i \quad (27)$$

Donde ρ es la densidad del material, V es el volumen del objeto y a_i es la aceleración que posee la cabeza es su centro de gravedad. Los volúmenes de los modelos de cabeza analizados, y que se utilizaran en la ecuación (27) se muestran en la Tabla 5:

	Vol. Cabeza P [mm^3]	Vol. Cabeza M [mm^3]	Vol. Cabeza G [mm^3]
Hombre	3077844.3501	4457732.4189	6163464.7967
Mujer	2852738.7422	4120973.7546	5713508.9485

Tabla 5. Volúmenes de los 6 modelos de cabeza analizados.

Una vez conocido el volumen de cada modelo y sabiendo que el material escogido para la cabeza humanas es una aleación de Magnesio, el cual tiene una densidad de $1740 \text{ kg}/m^3$ podemos estimar la fuerza actuante sobre la cabeza a partir de la aceleración registrada cerca del centro de gravedad y que se ha analizado en el apartado 5.1.

Los resultados se muestran en la Tabla 6:

	Cabeza Pequeña [N]	Cabeza Mediana [N]	Cabeza Grande [N]
Hombre	5280.5	13822	17009
Mujer	11461	19791	17714

Tabla 6. Fuerza experimentada por la cabeza para los 6 modelos analizados.

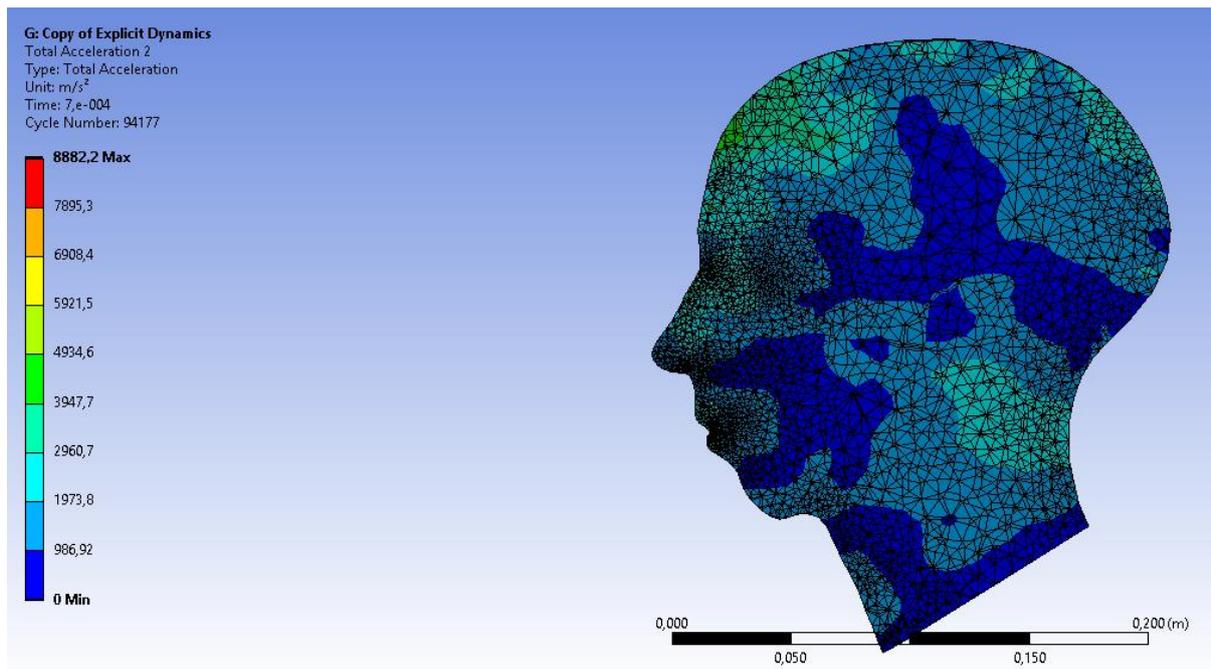
5.3. Estudio de la influencia del tamaño de la cabeza en la respuesta mecánica. Comparativa entre modelos de cabeza hombre/mujer

Como se ha observado en la simulación numérica de los test de impacto coronal a baja velocidad, una variable importante ha sido el tamaño de la cabeza. Se observa que, al variar el tamaño se tiene un aumento o disminución muy considerable de las aclaraciones sufridas por la cabeza.

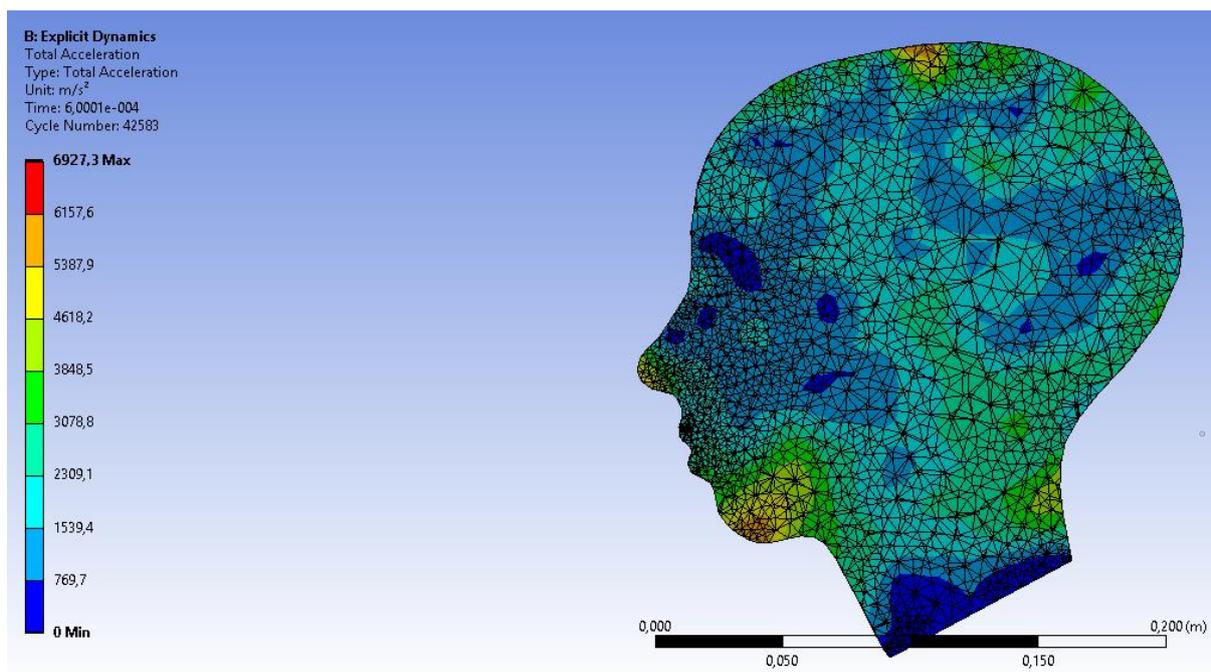
Dentro de la categoría de las cabezas de los hombres, se ha observado un crecimiento de la aceleración con el aumento del tamaño de la cabeza, especialmente de un tamaño pequeño a uno mediano. De modo que, buscando no superar un determinado valor de aceleración máxima, se podrá ahorrar material y recursos económicos para los cascos de menor tamaño.

Para el caso de la cabeza de mujer, la primera característica a destacar es que el crecimiento de las aceleraciones con el tamaño presenta una tendencia diferente al caso de los hombres. Como se puede ver en el caso de la cabeza pequeña y mediana las aceleraciones son bastante similares, además, el resultado de la aceleración en la cabeza de mayor tamaño disminuye considerablemente respecto a las aceleraciones obtenidas en las cabezas de menor tamaño.

Es importante resaltar que la generación de los modelos de cabeza se ha llevado a cabo teniendo en cuenta los mismos parámetros morfométricos tanto para hombre como para mujer (ver Figura 5). No obstante, parece claro que existen otros rasgos anatómicos entre sexos, independientes de las medidas características aplicadas, que son los causantes de que haya una variación importante en el volumen de la cabeza. Esto repercute en un comportamiento dinámico sustancialmente desigual entre los modelos de cabeza de hombre y mujer, ya que se observan valores diferentes tanto en la aceleración (ver Figuras 27, 28 y 29) como en la fuerza actuante, para los mismos tamaños de cabeza.

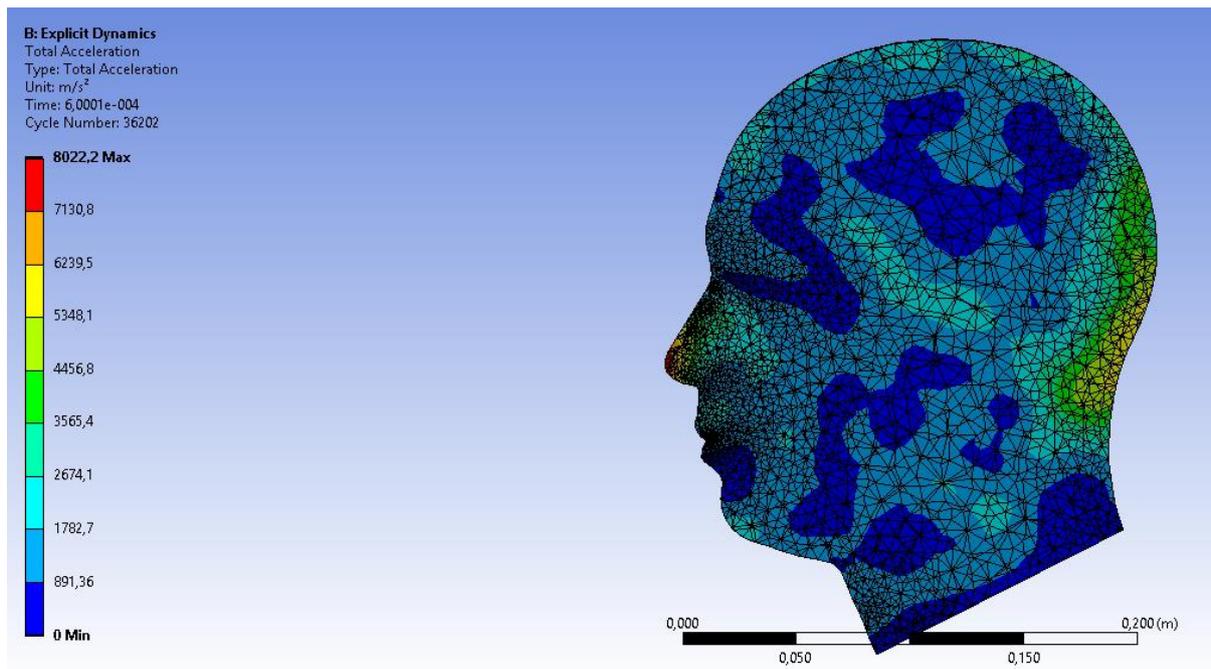


(a) Modelo de cabeza tamaño P de hombre

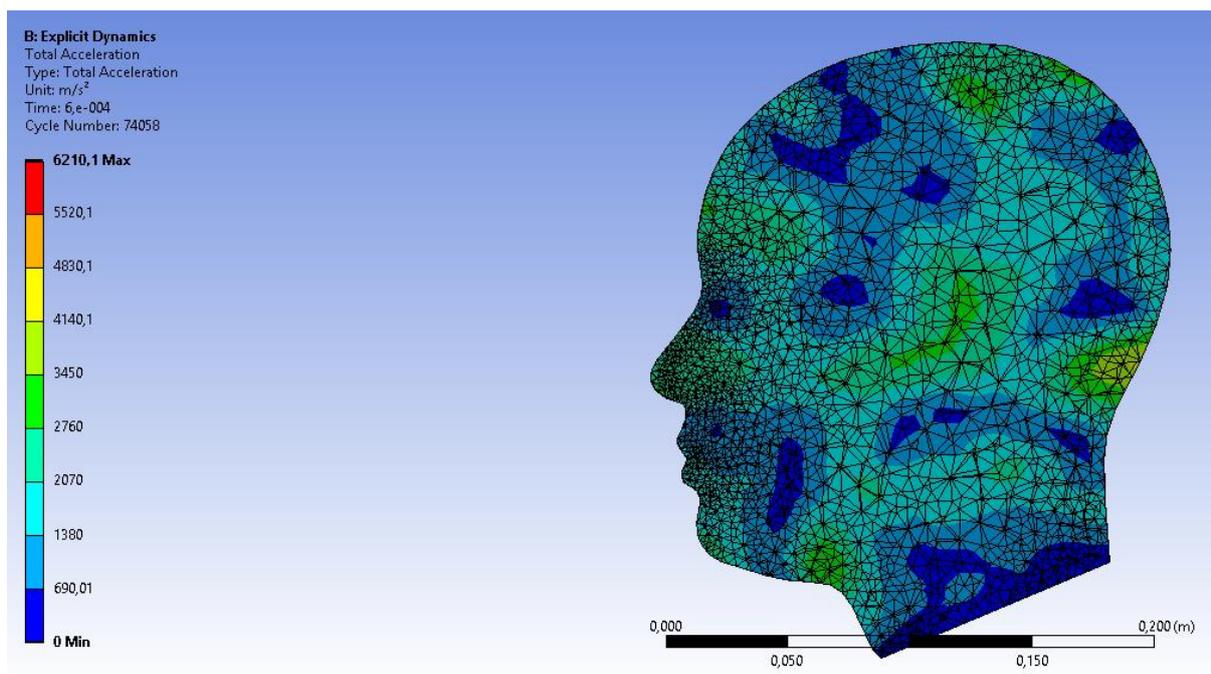


(b) Modelo de cabeza tamaño P de Mujer

Figura 27. Comparativa de aceleraciones entre modelos de cabeza pequeña de hombre y mujer.

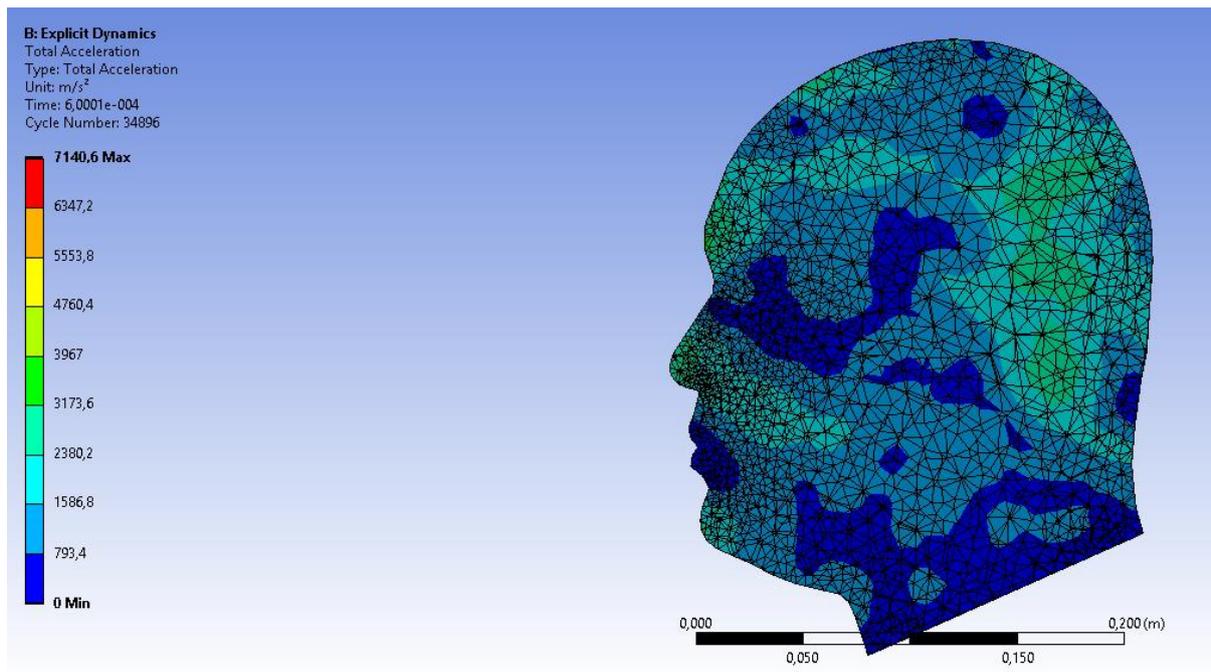


(a) Modelo de cabeza tamaño M de hombre

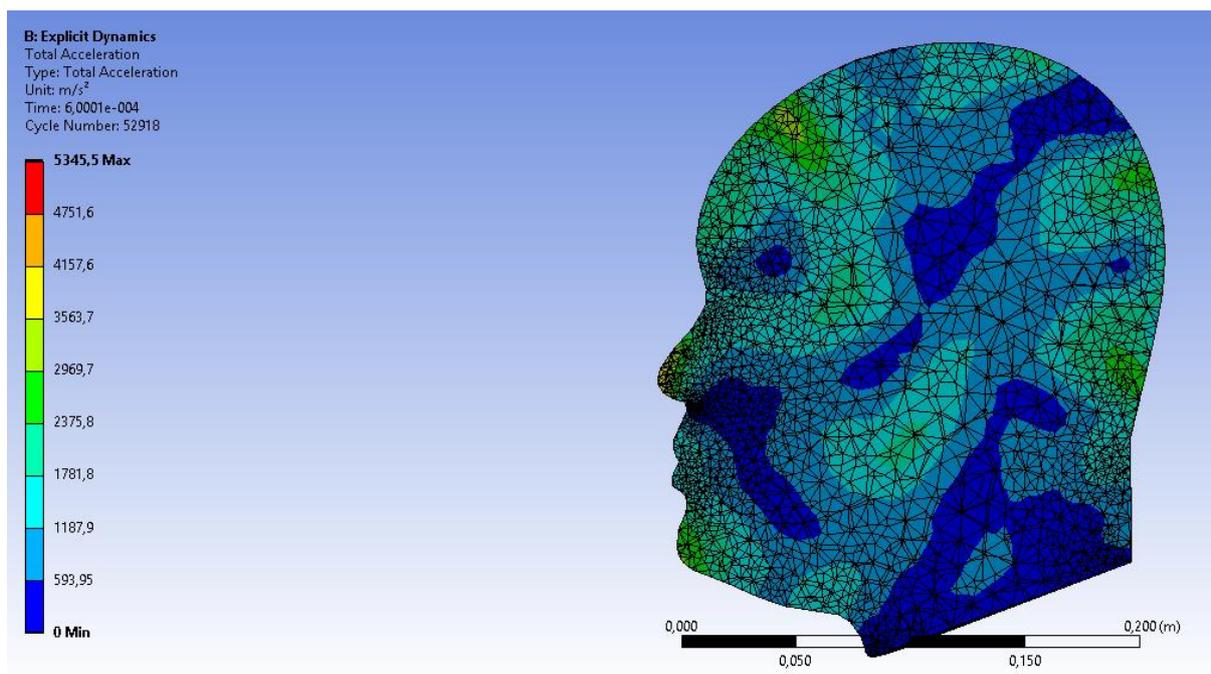


(b) Modelo de cabeza tamaño M de mujer

Figura 28. Comparativa de aceleraciones entre modelos de cabeza mediana de hombre y mujer.



(a) Modelo de cabeza tamaño G de hombre



(b) Modelo de cabeza tamaño G de mujer

Figura 29. Comparativa de aceleraciones entre modelos de cabeza grande de hombre y mujer.

6. CONCLUSIONES

Como primera conclusión se destaca las diferencias morfométricas existente entre la cabeza de hombres y mujeres. A la vista de la Tabla 5, se observa que, para cabezas del mismo tamaño, es decir, con los mismos valores antropométricos especificados en el programa, se encuentra una diferencia de volumen entre las cabezas de hombre y mujer muy importante. Esta diferencia es atribuible a otros parámetros craneológicos que varían según el sexo (dimorfismo sexual), como, por ejemplo, la mayoría de los parámetros relacionados con la mandíbula, donde en caso de los hombres es masiva y más robusta que en el caso de la mujer; en cambio existen otros parámetros como, por ejemplo, el ángulo del nasión, que son superiores en mujeres que en hombres. También se puede destacar de los resultados de los volúmenes, que, desde el punto de vista del comportamiento dinámico frente a impacto coronal a baja velocidad, no resulta indicado establecer la equivalencia entre una cabeza de hombre pequeña con una mediana de mujer o que una mediana de hombre con una grande de mujer. Por lo tanto, en el diseño de un casco como elemento de protección se debería diferenciar tallas específicas para cascos de hombre y de mujer.

Como segunda conclusión, destacar que la norma EN397 recomienda que la aceleración sufrida en la región cerebral de la cabeza debe ser menor a 250 g para garantizar la ausencia de lesiones irreversibles. Por lo tanto, viendo los resultados de aceleraciones resumidos en la Tabla 4, se observa que las cabezas de mujer no cumplirían el límite, exceptuando la cabeza grande y por lo tanto se debería llevar a cabo una mejora en el diseño del espesor o configuración del material del casco de protección. Para el caso de las cabezas de hombre también se observa que para la cabeza mediana se superaría por poco el límite de aceleración establecido en la norma, por lo tanto, nuevamente se debería optimizar el material o su disposición en el casco de protección.

Para terminar, en aras a la realización de trabajos futuros, se enumeran distintos aspectos de este trabajo que se pueden mejorar.

- 1- En relación a la hipótesis 1, en lugar de realizar un escalado de la cabeza para crear la geometría del casco, se podría diseñar el elemento de protección con unas especificaciones dadas. Hay que tener en cuenta que, para ensayos de impacto con determinada inclinación, el escalado no sería una hipótesis válida.

- 2- Con respecto a la hipótesis 2, en lugar de obtener las constantes elásticas aparentes del caso por homogeneización numérica, se podría definir cada una de las características de los materiales con el módulo ACP de Workbench.
- 3- Para concluir, sería recomendable analizar distintas configuraciones de material y proporciones para diferentes tipos de casco, de este modo, se podría analizar su influencia en la protección frente a impacto y observar qué tipologías son más idóneas en el diseño del elemento de protección específico para hombre, mujer y diferentes tallas de ambos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ANSYS. *Ansys Help*. Obtenido de Workbench 2021 R1: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v211/en/wb2_help/wb2_help.html
- AZoM. (31 de Julio de 2013). *AZO MATERIALS*. Obtenido de Magnesium K1A-F Alloy (UNS M18010): <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8604>
- Byoung-Keon D. Park, e. a. (2020). A three-dimensional parametric adult head model with representation of scalp shape variability under hair. *Applied Ergonomics*, 1-9.
- CADEX THE SPECIALIST . (s.f.). *CADEX THE SPECIALIST TESTING LABORATORY EQUIPMENT*. Obtenido de EN960 - Full Headform - Magnesium K1A: http://www.cadexinc.com/en960_full_magnesium_k1a_headform.php
- Cascos de protección para la industria, EN 397:2012+A1:2012. Incorporada el 21 de Octubre del 2012.*
- Expósito, J. (2017). Así se fabrica el nuevo casco de combate. *Revista Española de Defensa*, 30-33.
- Lee, H.-H. (2012). *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14*. SDC Publications.
- Reglamento 22 (BOE, Num 300) sobre Prescripciones Uniformes relativas a la homologación de Cascos. Publicado el 15 de Diciembre de 1984.*
- Stijn Verwulgen, e. a. (2018). A new data structure and workflow for using 3D anthropometry in the design of wearable products. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 108-117.
- U.S. Army Natick Soldier Research, D. a. (August 2011). *MEASURER'S HANDBOOK: US ARMY AND MARINE CORPS ANTHROPOMETRIC SURVEYS, 2010-2011*. Massachusetts. Obtenido de <http://tools.openlab.psu.edu/publicData/ANSURII-TR11-017.pdf>
- UNITED STATES ARMY NATICK RESEARCH, DEVELOPMENT AND ENGINEERING CENTER NATICK. (1989-1990). *1988 ANTHROPOMETRIC SURVEY OF U.S. ARMY PERSONNEL: PILOTS SUMMARY STATISTICS*.

Documento 2

Pliego de Condiciones

ÍNDICE

1. OBJETO DEL PLIEGO DE CONDICIONES	63
2. CONDICIONES GENERALES	63
2.1. Condiciones Administrativas	63
2.1. Condiciones de los recursos informáticos	64
2.2.1. Condiciones del hardware	64
2.2.2. Condiciones del software	64
2.3. Condiciones de interpretación y uso de resultados	65

1. OBJETO DEL PLIEGO DE CONDICIONES

El presente pliego de condiciones refleja las relaciones que hay entre proyectista, tutora del proyecto y las diferentes partes implicadas, de forma que se describan las condiciones generales de este trabajo. También se abordarán las condiciones de uso de la información revelada en este documento.

2. CONDICIONES GENERALES

Se reconoce de forma pública las marcas registradas que se han usado en el presente proyecto, del mismo modo, también se reconoce los derechos de autor de la bibliografía que se consultado para la realización del trabajo.

No está permitido la reproducción total o parcial de este proyecto, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de este de ninguna forma sin el permiso previo y por escrito del ingeniero firmante del proyecto Borja Monsálvez Pozo.

2.1. Condiciones Administrativas

El promotor del presente proyecto es el Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño en la Universitat Politècnica de València. La tutora es la Dra. Ana Vercher Martínez. El proyectista es D. Borja Monsálvez Pozo, alumno del Grado en Ingeniería Mecánica.

Las condiciones a las que está sometido el proyectista son las siguiente:

- Cumplir con la legislación vigente.
- Llevar a cabo el proyecto según las indicaciones efectuadas por el promotor.
- Cumplir con la normativa sobre la realización de los proyectos fin de carrera vigente en la Universitat Politècnica de València, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño y el Dpto. de Ingeniería Mecánica de los Materiales.
- Respetar las leyes sobre derechos de autor.
- Consultar con el promotor cualquier modificación de las especificaciones iniciales.
- Informar periódicamente al promotor del estado de desarrollo del proyecto.

El proyectista está amparado por una serie de derechos, a saber:

- Disponer de un sistema informático adecuado para la realización del proyecto.
- Ser informado por el promotor sobre los derechos legales acerca del proyecto.
- Recibir soporte técnico para cualquier problema imprevisto que pueda surgir.

- En caso de ausencia del promotor del proyecto, el proyectista tendrá plena potestad en la toma de decisiones relativas a la ejecución del proyecto.

2.2. Condiciones de los recursos informáticos

Para poder llevar a cabo la realización de los modelos geométricos, hacer uso de las rutinas de homogeneización y realizar los análisis dinámicos explícitos es necesario el uso de recursos informáticos.

2.2.1. Condiciones del hardware

Se ha utilizado un ordenador portátil de la marca Asus, tanto para trabajar en local como para acceder de forma remota a la universidad y de esta manera, realizar el tratamiento de los modelos y los cálculos de impacto mediante elementos finitos.

Las características del portátil son:

- Procesador Intel(R) Core (TM) i7-6700HQ @ 2.6Hz
- Memoria RAM de 8GB
- Tarjeta Gráfica NVIDIA GeForce GTX 950M
- Unidad de almacenamiento de 500GB
- Sistema operativo Windows 10 Home

2.2.2. Condiciones del software

Debido al uso de herramientas informáticas en el formato académico que han sido necesarias para la realización del presente proyecto, hay una serie de condiciones y requisitos que limitan el uso de éstas. El no cumplimiento implica la imposibilidad de llevar a cabo el modelo y análisis por elementos finitos.

ANSYS Inc.

Dentro de la gran variedad de módulos que hay dentro de ANSYS, se han utilizado dos. Uno de estos ha sido ANSYS APDL junto con *scripts* programados en Matlab para poder realizar la homogeneización. Por otro lado, ANSYS WORKBENCH ha sido utilizado mayoritariamente en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado. Se ha utilizado para poder realizar el tratamiento geométrico de los modelos de cabeza, la generación de los cascos y la ejecución de los análisis de impacto mediante el uso de *Explicit Dynamics*. El uso de estos dos programas conlleva el tener la licencia del programa.

MATLAB R2020a

Es una herramienta matemática con un lenguaje de programación propio (Lenguaje M). Se ha utilizado para la realización de la homogenización de las propiedades elásticas del material que se usa en el casco.

OTROS

Para la lectura de información, tratamiento de información y realización del proyecto se ha hecho uso de Adobe Acrobat, Microsoft Word y Power Point.

2.3. Condiciones de interpretación y uso de resultados

El autor del presente proyecto no se hace responsable del uso de los resultados obtenidos en el trabajo. Estos resultados deben validarse de forma empírica.

De igual forma, los resultados de este Trabajo Fin de Grado se han obtenido realizando diferentes hipótesis y simplificaciones durante el desarrollo de los modelos, por lo tanto, los resultados deben ser interpretados de una forma cualitativa y no cuantitativa y siempre condicionados por las hipótesis adquiridas durante su realización.

Documento 3

Presupuesto

ÍNDICE

1. COSTES DE MATERIALES	68
2. COSTE DE MANO DE OBRA	69
3. COSTE DE UTILIZACIÓN DEL EQUIPO	70
4. GASTO GENERAL	70

1. COSTES DE MATERIALES

REFERENCIA	DESCRIPCION	UNIDADES	CANTIDADES	PRECIO (€/unidad)	PRECIO PARCIAL
Mat 1	Licencia del Software ANSYS 2020 para el ámbito académico	Año	0,5	6.000,00	3.000,00 €
Mat 2	Licencia del Software Matlab para el ámbito académico	Año	0,5	250,00	125,00 €
Mat 3	Licencia Microsoft Office 2021	Año	0,5	99,00	49,50 €
					3.174,50 €
	Costes Complementarios		2%		63,49 €
					3.237,99 €
	Costes de envío y gestión		3%		97,14 €
COSTE TOTAL DE MATERIALES					3.335,13

2. COSTE DE MANO DE OBRA

Cuando se haya obtenido el Título de Graduado en Ingeniería Mecánica, la retribución económica correspondiente en Valencia equivale a 27 €/hora según el Instituto Valenciano de la Edificación para el 2018.

REFERENCIA	TRABAJO	UNIDADES	CANTIDAD
Trabajo 1	Búsqueda y captación de información en artículos, libros e internet para la ejecución del trabajo	h	95,00
Trabajo 2	Generación de cabezas mediante el software libre según se explica en el apartado 4.1.1	h	3,00
Trabajo 3	Adaptación de las cabezas generadas por el software libre	h	4,00
Trabajo 4	Generación de los cascos para las 6 cabezas	h	5,00
Trabajo 5	Elección de la forma del impactador y del material empleado	h	4,00
Trabajo 6	Homogeneización para la obtención del material a usar en los cascos	h	6,00
Trabajo 7	Búsqueda y elección del material para las cabezas	h	2,00
Trabajo 8	Generación de los casos a analizar mediante <i>explicit dynamics</i>	h	35,00
Trabajo 9	Evaluación y tratamiento de los resultados adquiridos	h	12,00
Trabajo 10	Redacción y revisión del proyecto	h	134,00
Coste Total Ingeniero Técnico		300 h x 27,00 €/h	8.100,00 €
Coste de Guiado y supervisión de la tutora durante el proyecto		15%	1.215,00 €
COSTE TOTAL DE MANO DE OBRA DIRECTA			9.315,00 €

3. COSTE DE UTILIZACIÓN DEL EQUIPO

REFERENCIA	DESCRIPCION	UNIDADES	CANTIDAD	PRECIO (€/Unidad)	PRECIO PARCIAL
Equipo 1	Ordenador portátil Asus con i7 - 6700HQ y 8GB de RAM	Ud.	1	800	800 €
COSTE TOTAL DE UTILIZACIÓN DEL EQUIPO					800 €

4. GASTO GENERAL

COSTE TOTAL DE MATERIALES	3.335,13 €
COSTE TOTAL DE MANO DE OBRA	9315,00 €
COSTE TOTAL DE UTILIZACIÓN DEL EQUIPO	800 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	13.450,13€
PRESUPUESTO GLOBAL	
PEM	13.450,13 €
GASTOS GENERALES (9%)	1.210,51 €
BENEFICIO INDUSTRIAL (6%)	807,01 €
PRESUPUESTO DE CONTRATA	15.467,65 €
I.V.A (21%)	3.248,21 €
COSTE GENERAL DEL PROYECTO	18.715,86 €