



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

  
ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

Diseño de un casco de combate fabricado con materiales  
compuestos.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: León Arona, Alejandro

Tutor/a: Belda González, Ricardo

Cotutor/a: Quiñonero Moya, Antonio Ramón

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



# Diseño de un casco de combate fabricado con materiales compuestos

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales

Autor:

Alejandro León Arona

Tutores:

Ricardo Belda González y Antonio Ramón Quiñonero Moya

# Resumen

Debido a los conflictos internacionales actuales, los sistemas de protección personal cobran una gran importancia para salvar un mayor número de vidas y disminuir las lesiones en la cabeza. Los laminados compuestos por plásticos reforzados con fibras se vienen utilizando en diseños de cascos de combate dadas sus características mecánicas, que permiten mantener el nivel de protección disminuyendo su peso. Por ello, en el presente Trabajo de Fin de Grado se diseña y modela una calota de casco de combate fabricada con materiales compuestos. En el proceso de diseño, se han tenido en cuenta, inicialmente, probetas de material compuesto tipo placa, sobre las que se simulan impactos balísticos. Se utiliza la teoría de elementos finitos mediante el software comercial de elementos finitos llamado Abaqus. Con la utilización de este programa, se estudia cómo influyen diversos parámetros como el tamaño de elemento o la configuración de laminado utilizada en las simulaciones. El objetivo de este paso es evaluar la configuración que permite absorber una mayor cantidad de energía durante el impacto. Tras la elección de la configuración final elegida, se realizan simulaciones para evaluar en detalle el desempeño del diseño, entre los que destacan el estudio de la influencia de la velocidad inicial de la bala en la energía absorbida por cada configuración de laminado. Los resultados muestran que los materiales con mejores características para un impacto balístico son el UHMWPE y la Fibra de Carbono, superando los dos la normativa sobre la resistencia de impacto a una velocidad inicial del proyectil. Finalmente, tras los estudios en la placa plana, se ha dispuesto a la validación del modelo y materiales sobre la geometría de una calota de combate. Sobre ella, se han realizado impactos balísticos y se ha analizado su respuesta, donde finalmente se ha comprobado la correcta funcionalidad del diseño, cumpliendo con los objetivos marcados durante el desarrollo del proyecto.

# Abstract

Due to the current international conflicts, personal protection systems have a great importance in saving more lives and reducing head injuries. Laminates composed of fiber-reinforced plastics are being used in combat helmet designs because of their mechanical properties, which maintain protection levels while reducing weight. For this reason, in this Final Degree Project, a combat helmet shell made of composite materials is designed and modeled. In the design process, composite material specimens in the form of plates were initially considered, and ballistic impacts were simulated on them. The finite element method is used with the commercial finite element software Abaqus. With the use of this program, various parameters such as element size and laminate configuration used in the simulations are studied. The goal of this step is to evaluate the configuration that allows the greatest amount of energy to be absorbed during the impact. After selecting the final configuration, simulations are carried out to evaluate the design performance in detail, with a particular focus on the influence of the bullet's initial velocity to estimate the energy absorbed by each laminate configuration. The results show that the materials with the best characteristics for ballistic impact are UHMWPE and Carbon Fiber, both exceeding the standard of the impact resistance at an initial projectile velocity. Finally, after the studies on the flat plate, the model and materials were validated on the geometry of a combat helmet shell. Ballistic impacts were carried out on it, and its response was analyzed, ultimately confirming the proper functionality of the design, meeting the objectives set during the project development.

# Resum

A causa dels conflictes internacionals actuals, els sistemes de protecció personal cobren una gran importància per salvar un major nombre de vides i disminuir les lesions al cap. Els laminats compostos per plàstics reforçats amb fibres s'han estat utilitzant en dissenys de cascos de combat per les seues característiques mecàniques, que permeten mantindre el nivell de protecció disminuint el seu pes. Per això, en el present Treball de Fi de Grau es dissenya i modela una calota de casc de combat fabricada amb materials compostos. En el procés de disseny, s'han tingut en compte, inicialment, provetes de material compost tipus placa, sobre les quals es simulen impactes balístics. S'utilitza la teoria d'elements finits mitjançant el programa comercial d'elements finits anomenat Abaqus. Amb la utilització d'aquest programa, s'estudia com influeixen diversos paràmetres com la mida de l'element o la configuració de laminat utilitzada en les simulacions. L'objectiu d'aquest pas és avaluar la configuració que permet absorbir una major quantitat d'energia durant l'impacte. Després de l'elecció de la configuració final triada, es realitzen simulacions per avaluar en detall el rendiment del disseny, entre les quals destaquen l'estudi de la influència de la velocitat inicial de la bala en l'energia absorbida per cada configuració de laminat. Els resultats mostren que els materials amb millors característiques per a un impacte balístic són l'UHMWPE i la Fibra de Carboni, superant tots dos la normativa sobre la resistència d'impacte a una velocitat inicial del projectil. Finalment, després dels estudis en la placa plana, s'ha disposat a la validació del model i materials sobre la geometria d'una calota de combat. Sobre ella, s'han realitzat impactes balístics i s'ha analitzat la seua resposta, on finalment s'ha comprovat la correcta funcionalitat del disseny, complint amb els objectius marcats durant el desenvolupament del projecte.

# Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. Gracias por haber estado a mi lado en los momentos más difíciles, cuando todo me parecía imposible y vosotros conseguíais ver la luz al final del túnel por mí. Sin vuestra paciencia, cariño y comprensión, no hubiera podido llegar hasta aquí.

A mis compañeros de clase, quienes siempre han compartido este camino conmigo lleno de aprendizaje. Las horas de estudio y de clase, las fiestas y las experiencias vividas juntos han sido la mejor parte de esta etapa en la universidad. Por ello estoy muy agradecido, en especial a Alvaro y Alberto, quienes se han convertido en una parte esencial en mi vida y han sido el mejor descubrimiento en esta etapa.

A mis amigos del pueblo, quienes han estado siempre ahí. Gracias por vuestra amistad y vuestra forma de ser tan pintoresca que siempre me ha ofrecido tantos momentos de alegría y desconexión cuando más lo necesitaba. Por siempre animarme a que fuera ingeniero y sacarlos de la pobreza, os quiero chavales.

Por último, pero menos importante, quiero agradecer a mis tutores, Ricardo y Antonio, cuya dedicación y orientación han sido cruciales para la realización de este proyecto. Os doy las gracias por vuestra dedicación hacia mi y no rendiros nunca conmigo ya que, sin vuestra guía, este proyecto no hubiera sido posible.

# Índice general

<b>MEMORIA</b> .....	2
<b>PLANOS</b> .....	73
<b>PLIEGO DE CONDICIONES</b> .....	75
<b>PRESUPUESTO</b> .....	78



# MEMORIA



# Índice

1.	Introducción .....	8
1.1.	Motivación.....	8
1.2.	Objetivos .....	9
1.3.	Estructura del documento.....	10
2.	Estado del arte.....	11
2.1.	Antecedentes de cascos militares .....	11
2.2.	Materiales utilizados en la historia.....	14
3.	Normativa aplicable.....	17
3.1.	Normativa STANAG .....	17
3.2.	Normativa NIJ .....	18
4.	Aspectos teóricos.....	20
4.1.	Tipos de materiales compuestos .....	20
4.2.	Características de las fibras. ....	22
4.3.	Materiales Ortótropos .....	24
4.4.	Modelos de daño para materiales compuestos .....	26
4.4.1.	Modelos de Tsai-Hill y Tsai-Wu.....	27
4.4.2.	Modelo de Hashin.....	28
4.4.3.	Modelo de Puck .....	29
4.5.	Método de los elementos finitos.....	32
5.	Desarrollo del modelo .....	34
5.1.	Modelo numérico placa plana con sistema interior .....	34
5.2.	Modelo numérico casco balístico .....	40
5.3.	Modelo numérico proyectil .....	42
6.	Resultados.....	44
6.1.	Estudio 1: simulaciones sobre placa. Efecto malla elementos finitos y configuración de laminado.....	44
6.1.1.	Influencia del mallado .....	45
6.1.2.	Configuración del laminado .....	53
6.2.	Estudio 2: estudio paramétrico de la v50 .....	56
6.3.	Estudio 3: Impacto sobre el casco .....	60

7. Conclusiones y limitaciones .....	65
7.2. Limitaciones del proyecto.....	66
8. Bibliografía.....	67
9. Apéndices .....	69
9.1. Apéndice 1: Abaqus/Explicit.....	69

# Listado de figuras

Figura 2.1.1. Casco <i>Adrian</i> sacado [8] .....	11
Figura 2.1.2. Casco M1 [2] .....	12
Figura 2.1.3. Casco de combate PASGT [2] .....	13
Figura 2.1.4. Casco de combate ACH [2] .....	14
Figura 2.2.1. Estructura del Kevlar [6] .....	16
Figura 3.1.1. Dimensiones del proyectil según normativa STANAG[14].....	18
Figura 3.2.1. Ángulos de incidencia del proyectil [22].....	19
Figura 3.2.2. Planos de incidencia del proyectil en la cabeza[normativa Nij] .....	20
Figura 4.1.1. Compuesto laminado [23].....	21
Figura 4.2.1. Configuración de fibras dispuestas paralelamente [24] .....	23
Figura 4.2.2. Tipos de tejidos [24] .....	23
Figura 4.3.1. sistema de coordenadas [24] .....	25
Figura 5.1.1. Placa plana .....	35
Figura 5.1.2. Restricciones de movimiento en placa .....	38
Figura 5.1.3. Montaje de las simulaciones en placa .....	39
Figura 5.1.4. Mallado de la placa.....	39
Figura 5.2.1. Geometría calota.....	40
Figura 5.2.2. Restricción de la calota .....	41
Figura 5.2.3. Impacto lateral .....	41
Figura 5.3.1. Proyectil de 9 mm .....	42
Figura 6.1.1. Tres niveles de mallado: grueso, medio y fino.....	46
Figura 6.1.1.1. Instante inicial de impacto sobre placa en el mallado grueso .....	47
Figura 6.1.1.2. Resultado mallado grueso.....	47
Figura 6.1.1.3. Instante inicial de impacto sobre placa en el mallado medio .....	47
Figura 6.1.1.4. Resultado mallado medio .....	48
Figura 6.1.1.5. Instante inicial de impacto sobre placa en el mallado fino .....	48
Figura 6.1.1.6. Resultado mallado fino .....	48
Figura 6.1.1.7. Fuerza recibida en diferentes refinados .....	50
Figura 6.1.1.8. Desplazamiento de la malla para los diferentes refinados.....	52
Figura 6.1.2.1. Sistema de referencia [ T5 diseño] .....	53
Figura 6.1.2.2. Fuerza laminados 1 y 2.....	55
Figura 6.1.2.3. Fuerza laminados 3 y 4.....	55
Figura 6.1.2.3. Fuerza laminados 5 y 6.....	55
Figura 6.2.1. Resultados configuración [15/-15/45/-45].....	57
Figura 6.2.2. Resultados configuración [15/30/45/60].....	58
Figura 6.3.1. Momento de impacto en material UHMWPE .....	60
Figura 6.3.2. Momento de impacto 2 en material UHMWPE.....	61
Figura 6.3.3. Momento de impacto 3 en material UHMWPE.....	61

## Diseño de un casco de combate fabricado con materiales compuestos

Figura 6.3.4. Resultado del impacto en UHMWPE .....	61
Figura 6.3.5. Momento de impacto en material fibra de carbono .....	62
Figura 6.3.6. Momento de impacto 2 en material fibra de carbono.....	63
Figura 6.3.7. Momento de impacto 3 en material fibra de carbono.....	63
Figura 6.3.4. Resultado impacto en fibra de carbono .....	63

## Lista de Tablas

Tabla 2.2.1. Propiedades de fibras utilizadas como refuerzo en materiales compuestos .....	15
Tabla 5.1.1. Propiedades UHMWPE.....	35
Tabla 5.1.2. Propiedades Kevlar .....	36
Tabla 5.1.3. Propiedades fibra de carbono.....	36
Tabla 5.1.4. Propiedades gelatina balística.....	36
Tabla 5.3.1. Propiedades latón.....	43
Tabla 6.1.2.1. ALLIE de las diferentes configuraciones .....	54

## Nomenclatura

V50: velocidad 50% de probabilidad de que la bala atravesase el casco

$\sigma$ : tensión

$\epsilon$ : deformación

A: esfuerzo de flujo estático a una tasa de deformación de referencia y temperatura ambiente

B: coeficiente de endurecimiento

C: coeficiente de sensibilidad a la tasa de deformación

n: exponente de endurecimiento

E: módulo elástico o de Young

# 1. Introducción

Actualmente, con la aparición de distintos conflictos militares por todo el mundo que están desencadenando en guerras, los equipos de protección son una prioridad fundamental a tener en cuenta. Estos equipos son cruciales para asegurar la integridad y la seguridad de los soldados. A lo largo de la historia, los equipos de protección han evolucionado tanto en diseño como en los materiales utilizados. Esta evolución ha sido impulsada con el objetivo de mejorar continuamente la resistencia y rendimiento de estos equipos, adaptándose a las exigencias y amenazas que han surgido a través de los avances tecnológicos.

Entre los equipos de protección, los cascos de combate cobran una importancia considerable ya que protegen contra fuertes traumas craneales. A lo largo del tiempo, estos cascos han experimentado una gran evolución. Inicialmente se fabricaban con materiales metálicos y diseños sencillos, pero en la actualidad se emplean materiales más avanzados e innovadores, conocidos como materiales compuestos, para mejorar su eficacia y ofrecer una protección superior.

Los materiales compuestos son una solución bastante adecuada ante la aparición de nuevas armas y técnicas de combate, debido a que estos materiales poseen una gran resistencia a impacto, una gran absorción de energía y un peso reducido respecto a materiales tradicionales.

Por tanto, el presente trabajo se centra en el diseño y simulación de un casco balístico con la utilización de materiales compuestos. Para realizar este proyecto se utiliza *Abaqus CAE* para la generación del modelo numérico y *Abaqus/Explicit* para el cálculo de las simulaciones dinámicas.

## 1.1. Motivación

La motivación de este trabajo viene dada por la amenaza en la que se encuentra el mundo debido a los conflictos bélicos entre varios países, lo que provoca un riesgo en la vida de las personas que combaten en dichos conflictos. Debido a esto, me motiva poder ayudar a las personas que se juegan la vida por su país, intentando contribuir con su seguridad mediante el avance de los equipos de protección que se equipan. Mitigar las lesiones encefálicas traumáticas que pueden aparecer tras impactos balísticos resulta de gran importancia. Por ello, he pensado que la mejor forma de contribuir con su seguridad sería mejorar uno de los equipos más fundamentales de la protección balística, el casco de combate.

Este proyecto no solo se basa en un trabajo académico, sino también un medio de aprendizaje de este tema que pueda servir como guía para otros estudiantes sobre los equipos de protección y los materiales compuestos. Para llegar a este resultado, se pretende aprovechar las innovaciones tecnológicas como, por ejemplo, nuevos materiales compuestos que ofrecen unas mejores características que los ya existentes y la utilización de modelos más avanzados que puedan simular la realidad con más exactitud lo que proporciona unos resultados más precisos.

## 1.2. Objetivos

El principal objetivo de este Trabajo Final de Grado (TFG) es el diseño y modelado de un casco de combate balístico fabricado mediante materiales compuestos. Para alcanzar este objetivo se han seguido una serie de pasos que permiten la validación de los modelos desarrollados.

Para alcanzar el objetivo principal del proyecto, se plantean varios objetivos específicos:

1. Revisión de la literatura: se trata de buscar toda la información disponible de la situación actual de los cascos de combate y de los materiales compuestos que se utilizan. Con ello, se busca analizar profundamente cuál es el estado del arte y sacar conclusiones que puedan aportar información a la hora de realizar el diseño y las simulaciones.
2. Diseño de la calota: desarrollar un modelo geométrico de la calota de un casco de combate que proporcione una protección extensa en la cabeza de los usuarios y una comodidad en su uso.
3. Selección de materiales: seleccionar qué materiales compuestos son los más adecuados para el diseño del producto, considerando factores como la resistencia y la orientación de las láminas de cada material compuesto.
4. Desarrollo de un modelo numérico de una placa plana de pruebas: desarrollar un modelo numérico, mediante el *software Abaqus CAE*, para realizar simulaciones de impactos balísticos. En este modelo, se propone modificar diversos parámetros y analizar cómo afectan estos cambios a los resultados. Los parámetros por variar incluyen diversas configuraciones del laminado, el uso de diferentes materiales y la influencia del mallado.

El propósito de esta tarea es obtener un aprendizaje de los procesos involucrados y los factores a tener en cuenta para realizar un buen estudio.

5. Aprendizaje sobre las simulaciones: para la realización del estudio es necesario comprender como afectan diversos factores a las simulaciones y a los resultados, para realizar un trabajo en las simulaciones que se asimile a la realidad.
6. Estimación numérica de la velocidad del proyectil: para diversos materiales se pretende estudiar hasta que velocidad inicial del proyectil es capaz de soportar antes de alcanzar un fallo crítico lo que desemboque en que el material no pueda seguir su función de protección.

### 1.3. Estructura del documento

El trabajo está estructurado en varios capítulos. Estos capítulos en orden de aparición en el documento son:

- Estado del arte: en este capítulo se revisa cuáles son los antecedentes de los cascos de combate a lo largo de la historia y los materiales que han sido utilizados hasta la actualidad.
- Aspectos teóricos: se explican diferentes aspectos sobre los materiales compuestos como los tipos que existen y los tipos de fibras. Por último, se comentan detalles del método de elementos finitos.
- Desarrollo del modelo: en el tercer capítulo aparece la creación de los distintos modelos numéricos en el *software* Abaqus, en los cuales se desarrollarán diferentes modelos con distintos materiales para valorar las diferentes opciones disponibles. Cada opción incluye el desarrollo de las geometrías, materiales, condiciones de contorno y laminados.
- Resultados: este capítulo es el más importante, donde se muestran los resultados de las diferentes opciones del modelo numérico y que comportamiento será mejor para un diseño final.
- Conclusiones: en este último capítulo se hace un resumen de todo lo visto en el proyecto y se comentan los resultados obtenidos. También se comentan algunas dificultades encontradas a la hora de la realización del proyecto y líneas futuras de estudio.



## 2.Estado del arte

### 2.1. Antecedentes de cascos militares

En la historia de la humanidad han existido numerosos conflictos militares que han derivado en una constante mejora de los equipos de protección para garantizar la vida de los soldados que participan en dichos conflictos. Sin embargo, la utilización de los cascos de combate no fue significativa hasta la aparición de armas y artillerías más letales en la I Guerra Mundial.

Uno de los primeros cascos introducidos en la I Guerra Mundial fue el casco *Adrián*, se puede visualizar en la Figura 2.1.1., y está fabricado de acero. Este casco fue introducido en 1915 por el general *Adrián*, del ejército de Francia. La introducción de este casco a los soldados franceses fue debida al aumento de las heridas en la cabeza por impactos de fragmentos de la artillería pesada y fuego indirecto como muestra [21], lo que muestra el interés por la mitigación de lesiones encefálicas traumáticas desde el siglo pasado.



Figura 2.1.1. Casco *Adrian* sacado [8]

A partir de la irrupción de este modelo, diversos gobiernos en Europa empezaron a investigar con el fin de evolucionarlo. Tras una investigación exhaustiva [19], se consiguió desarrollar un nuevo acero con propiedades superiores a los ya existentes. Este acero se llama *Hadfield Steel* y con él se desarrolló el modelo *Hadfield Helmet* y diversas variantes, que se utilizaron en números conflictos de principios del siglo XX.

Posteriormente, como cuenta C.Y. Tham et al. (2008) [21], la armada de U.S. evolucionó el modelo de la época para crear el modelo M1, como se puede visualizar en la Figura 2.1. 2.. Este modelo fue implantado en 1942 y estuvo en servicio aproximadamente 30 años, estando presente en la II Guerra Mundial. Las características del casco M1 respecto a los anteriores eran superiores, llegando a proteger al usuario de balas de 15g del calibre 0.45 a una velocidad de 244 m/s. La mayor desventaja de este modelo fue que sólo estaba en una talla y resultaba incómodo para los soldados con una cabeza fuera de lo estandarizado.



Figura 2.1.2. Casco M1 [2]

Tras las dos Guerras Mundiales vividas por la humanidad, ante la alta mortalidad en los combates y el avance cada vez más veloz de la tecnología, surgió la necesidad de mejorar las prestaciones de los equipos de protección. Por ello, en torno al final del siglo XX, se empezaron a desarrollar modelos de cascos con unas mejores características y que pudieran soportar un mayor impacto balístico. Otro aspecto que se buscaba era una mayor comodidad del usuario bajando considerablemente el peso.

En el proceso de desarrollo de un nuevo modelo de casco, entró en acción la armada de Estados Unidos que creó el primer modelo de casco y chaleco fabricado con materiales no metálicos.

El modelo de casco desarrollado fue llamado *Personal Armour System for Ground Troops* (PASGT) y estaba fabricado de un material compuesto llamado Kevlar, en especial Kevlar 29, que fue recientemente descubierto por la empresa DuPont en 1965 [6]. Este casco, mostrado en la Figura 2.1.3., proporcionó una mayor comodidad y unas mejores prestaciones respecto al modelo anterior M1. Según C.Y. Tham et al (2008) [21], este casco de combate podía soportar un

impacto de un calibre de 9 mm. Además, el casco soportaba un impacto balístico frente a proyectiles FSP de 1.1 g de calibre 0.22 hasta los 610 m/s en el límite balístico  $V_{50}$ .



Figura 2.1.3. Casco de combate PASGT [2]

La creación del primer casco balístico a partir de materiales compuestos desencadenó que el resto de los países empezaran a desarrollar sus propios modelos, probando nuevos materiales compuestos que recién se descubrían por el final del siglo XX.

Posteriormente, la armada de los Estados Unidos diseñó y desarrolló un nuevo casco llamado *Modular Integrated Communications Helmet* (MICH) para reemplazar el modelo PASGT. Este modelo que duró en servicio hasta 2002, tenía cambios significativos respecto al modelo anterior, incluyendo láminas de Kevlar mejoradas que incluían refuerzos en su fibra lo que ofrecía una mejoría notable. Además, este nuevo casco diseñado tenía un peso bastante inferior al anterior y reemplazaba el sistema de retención tradicional por un sistema de retención de almohadilla múltiple y cuatro puntos de anclaje. Este sistema ofrecía una mayor resistencia a impacto al mismo tiempo que proporcionaba una mayor comodidad. En base a este modelo, se han desarrollado diversos modelos derivados, modificándose el material de las fibras y de las resinas. Un ejemplo de modelo derivado es el *Advanced Combat Hellmet* (ACH), mostrado en la Figura 2.1.4., que fue desarrollado por la armada de los Estados Unidos.



Figura 2.1.4. Casco de combate ACH [2]

En la actualidad [4], tras la mejora de los equipos y nuevos materiales, la tecnología de los cascos de combate ha avanzado significativamente y ha desembocado en una nueva generación de cascos utilizando *ultra-high-molecular-weight polyethylene fibers* (UHMWPE). Este nuevo tipo de material ha provocado que se estudien y analicen diversas configuraciones del mismo para encontrar una solución mejor que proporcione un rendimiento y características muy superiores a los anteriores, lo que permite un nivel mayor de protección frente a calibres superiores y una mayor comodidad.

## 2.2. Materiales utilizados en la historia

En la historia de los cascos de combate, se han utilizado diversos tipos de materiales que han ido avanzando con el paso del tiempo a medida que la tecnología avanza. En este apartado se comentan diversos materiales que han tenido un uso importante en los cascos de combate.

En primer lugar, cuando el uso de cascos de combate cogió fuerza en la entrada de la I Guerra Mundial, los cascos empleados estaban fabricados en su mayoría por acero. Este metal tuvo una gran relevancia y en especial el *Hadfield Steel*.

El *Hadfield Steel* es un acero aleado que contiene un alto porcentaje de manganeso, entre un 10 % y un 14 %, lo que le proporciona al acero un alto endurecimiento y tenacidad. Estas características lo hacían un acero ideal para resistir impactos, mejorando las prestaciones del resto de aceros de la época. Debido a sus altas prestaciones, ha sido utilizado en diversos modelos durante la I Guerra Mundial.

El creador del *Hadfield Steel* fue Robert Hadfield, un científico que desarrolló este acero en 1882. Este descubrimiento tuvo mucha relevancia en la época porque marcó el nacimiento del desarrollo y utilización de los aceros aleados en la historia.

Tras el uso de diversos aceros durante una época extensa en el siglo XX, en la historia reciente, entre finales del siglo XX y la actualidad, se ha expandido notablemente el uso de materiales compuestos ante la necesidad de utilizar materiales con una mayor tenacidad y un menor peso, para proporcionar al usuario un mayor confort de su uso y una mayor seguridad.

En los materiales compuestos hay varios tipos de fibras y matrices que proporcionan distintas características al material. En el ámbito de la protección balística existen bastantes fibras como la fibra de carbono, fibra de vidrio, etc., pero en especial se van a comentar dos tipos de materiales compuestos que han destacado en la historia reciente. En la Tabla 2.2.1., se puede visualizar las propiedades mecánicas de algunas fibras [6], [19].

<b>Material</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo elástico (GPa)</b>	<b>Tensión Rotura (GPa)</b>	<b>Deform. rotura (%)</b>
Kevlar 29	1440	70.3	2.92	3.6
Kevlar 49	1440	112	3	2.4
Vidrio	2545	72.4	2-3.5	4.8
Carbono	2500	85.5	3.4-4.8	5.4
UHMWPE	980	132	3.8	3.8

Tabla 2.2.1. Propiedades de fibras utilizadas como refuerzo en materiales compuestos

El primer tipo de material compuesto, que ha tenido bastante importancia en la historia de los materiales compuestos, es la fibra de aramida. La fibra de aramida [19], es una fibra sintética compuesta por macromoléculas de poliamida y existen dos tipos:

- Para-aramida: son aramidas que destacan por su alto módulo de elasticidad y su resistencia a impacto.
- Meta-aramida: son aramidas que destacan por su resistencia al calor y aislamiento térmico.

Para la fabricación de los cascos de combate, se han utilizado principalmente las para-aramidas, ya que tienen propiedades que se adaptan a las cargas dinámicas a las que se someten los cascos de combate.

Aunque se han utilizado diversos tipos de fibra de para-aramida en la industria, se va a comentar en especial el Kevlar que ha estado presente en la mayoría de los equipos de protección durante décadas.

El Kevlar es una fibra de aramida, del tipo para-aramida, que fue desarrollada por la empresa DuPont en 1965 y según [6], fue diseñada por la necesidad de producir una extensión en cadena de polímero y un empaquetamiento cristalino casi perfectos, y con ello conseguir un nivel bastante más elevado de tenacidad y módulo de elasticidad respecto a otros materiales de la época. El Kevlar está compuesto por largas cadenas de moléculas de para-fenileno tereftalamida y cada molécula está formada por la estructura molecular  $C_{14}H_{10}N_2O_2$  que se puede visualizar en la Figura 2.2.2.

A partir de la creación del Kevlar en 1965, se han creado numerosas variantes que modifican las fibras que lo componen y su estructura molecular. Con los avances tecnológicos, se ha llegado a reforzar las fibras para mejorar sus propiedades y actualmente es un material bastante utilizado en diversos sectores de la industria debido a sus propiedades mecánicas.

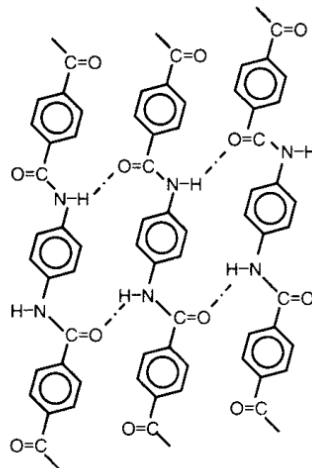


Figura 2.2.1. Estructura del Kevlar [6]

El segundo tipo de material compuesto que tiene un papel destacado en la industria durante los últimos años es el *ultra-high-molecular-weight polyethylene fibers* (UHMWPE). [26] El UHMWPE son unas fibras que poseen propiedades únicas que no están disponibles en otros compuestos poliméricos y por ello, ha recibido una atención significativa en los últimos años. Esta atención también es debida a que la densidad de este material es inferior a otros tipos de materiales compuestos, por lo que muestra una ventaja a tener en cuenta.

El UHMWPE [15] se empezó a comercializar en la década de 1970 debido a su amplio rango de aplicaciones en diversos sectores de la industria.

Esta fibra atrajo notablemente la atención debido a sus características mecánicas, su baja densidad, su resistencia química y resistencia al impacto. En la actualidad, tras los esfuerzos de diferentes laboratorios de investigación, se han desarrollado nuevas variantes de este material que presentan unas mejores propiedades. Algunos ejemplos de estas fibras son el Dyneema, Spectra o Tivar.

El uso de este material ha presentado diversos desafíos para la protección balística debido a que su deformación es bastante extensa y puede provocar traumas en la cabeza del portador del casco. Para solucionar este inconveniente en la actualidad, los fabricantes intentan proporcionar un equilibrio óptimo entre la química de la fibra y matriz, para reducir el trauma debido a la deformación y que pueda soportar el impacto balístico. Aunque presente algunos inconvenientes, este tipo de material está en continuo estudio para su mejoría y por ello es un material extensamente utilizado en diversos campos de la industria.

### 3. Normativa aplicable

Para el desarrollo de un casco de combate, es necesario establecer unas pautas y normas para evitar y reducir lesiones en la cabeza. En este apartado se abordan las diferentes normativas que se han tenido en cuenta para la creación y simulación de los impactos balísticos y así satisfacer los requisitos técnicos del casco de combate para su entrada en servicio.

#### 3.1. Normativa STANAG

La normativa STANAG (*Standardization Agreement*) es un conjunto de normas desarrollada por la OTAN que muestran los procesos, los parámetros y otros aspectos de vital importancia para el proceso de realizar un impacto balístico.

Esta normativa puede ser modificada por los países que componen la OTAN para adaptarla al ejército de su país. Por tanto, esta normativa ha resultado ser la base de las normativas de cada país y tiene una importancia relevante.

Para este trabajo, se enfoca en la normativa STANAG 4090 [14], que describe los procesos y parámetros que se deben seguir para realizar un impacto con un proyectil de bajo calibre ante una calota. Este documento recoge las características que debe presentar la munición de 9 mm que se emplea en los ensayos experimentales, tales como la geometría, mostrada en la Figura 3.1.1., y las especificaciones técnicas.

Entre las características de la normativa, hay que destacar varios aspectos de las especificaciones técnicas, que se tienen en cuenta a la hora de la realización de las simulaciones. En primer lugar, a la hora de la realización de ensayos, el tiempo de acción de la bala desde que se acciona el gatillo hasta el impacto no puede exceder los 3 milisegundos. En segundo lugar, la masa de la bala debe de estar comprendida entre 7 g y 8.3 g para que el ensayo pueda ser realizado de una forma correcta.

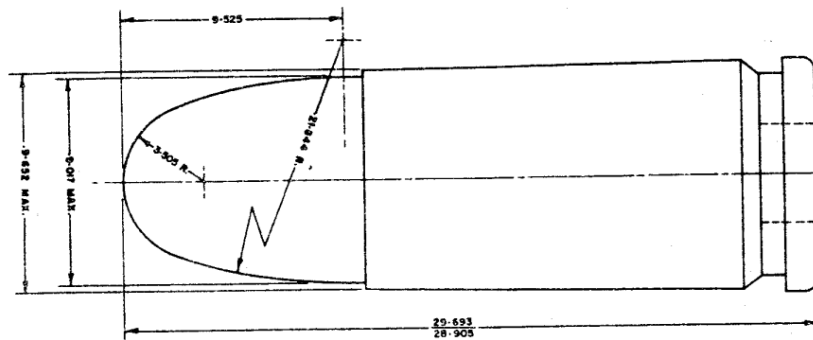


Figura 3.1.1. Dimensiones del proyectil según normativa STANAG[14]

### 3.2. Normativa NIJ

La normativa NIJ es una normativa desarrollada por el Laboratorio de Normas para la Aplicación de la Ley del Instituto Nacional de Normas y Tecnología. En este documento se recogen las especificaciones de funcionamiento y otros requerimientos para el equipo de protección y asegurar así un servicio de alta calidad.

En especial, para este proyecto se ha enfocado en la normativa NIJ Standard-0106.01 [22], en la cual se recogen las estandarizaciones para el funcionamiento y métodos para realizar ensayos en cascos con un impacto de proyectiles de 9 mm. Esta norma se divide en dos secciones en las que se especifican condiciones de los proyectiles y la disposición de los impactos en una cabeza para su ensayo.

En la primera sección en la que describe los requerimientos del proyectil, se han tomado diversas medidas para la simulación de impactos. Para la simulación de impactos, se realiza un impacto de alta velocidad y, como se muestra en la normativa, el proyectil debe de tener una velocidad inicial de impacto de  $358 \pm 15$  m/s. Además, para determinar que el casco cumple con las condiciones de calidad, deben de realizarse 4 impactos sin que el casco presente fallos de rotura.



En la segunda sección, en la que se informa de la disposición de los impactos en la geometría de la cabeza, se han tenido en cuenta varios aspectos. En primer lugar, como se muestra en la Figura 3.2.1., la normativa establece una línea de vuelo del proyectil, con un ángulo de incidencia respecto a la perpendicular del plano del punto de impacto.

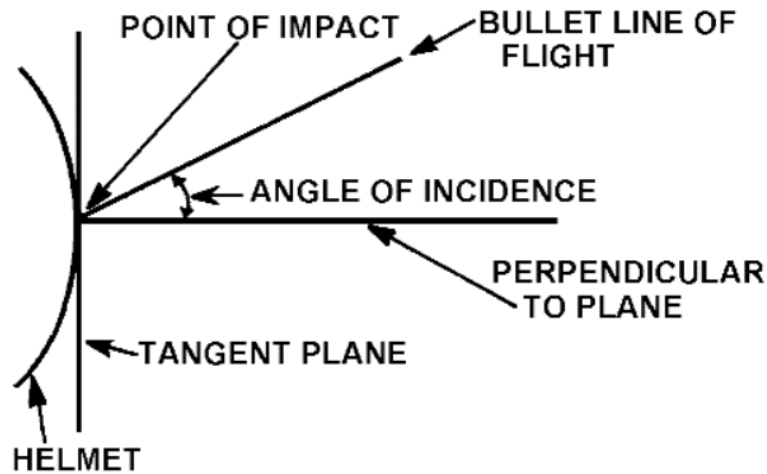


Figura 3.2.1. Ángulos de incidencia del proyectil [22]

En segundo lugar, para la modelización del casco de combate, la normativa expone las dimensiones que debe cumplir este modelo para realizar adecuadamente el ensayo. Aunque en la modelización del proyecto sólo se desarrolla la parte superior para un ahorro del coste computacional, se ha cumplido con las dimensiones marcadas por esta normativa.

Por último, la normativa también recoge los lugares de incidencia del proyectil en la geometría de la cabeza. En la Figura 3.2.2. se muestran los planos en los que, según la normativa, se deben de realizar los impactos balísticos en los ensayos.

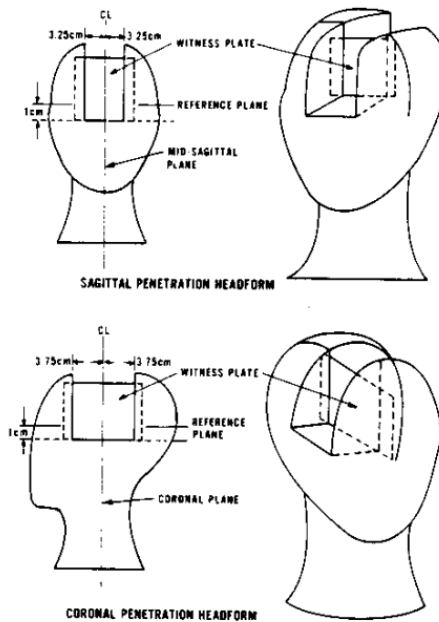


Figura 3.2.2. Planos de incidencia del proyectil en la cabeza [22]

## 4. Aspectos teóricos

Para la realización de ensayos en materiales compuestos, en primer lugar, debemos comentar aspectos importantes sobre ellos y el modelo utilizado para la definición de sus características. Por ello, en este apartado se muestran diferentes aspectos teóricos a tener en cuenta respecto a los materiales compuestos.

### 4.1. Tipos de materiales compuestos

Los materiales compuestos son un tipo de material que se ha extendido en diversos sectores de la industria como la automoción o la aeronáutica, debido a sus características superiores respecto a otros materiales.

Un material compuesto es una combinación de dos o más materiales que al combinarse forman un material con propiedades superiores a las propiedades de los componentes por separado [23]. Esta unión entre los componentes puede ser diversa y debido a ello, se pueden diferenciar tres tipos básicos de materiales compuestos:

#### 1. Compuestos reforzados con fibras:

Un material compuesto reforzado con fibras es un material que contiene fibras que, como comenta, se distribuyen en capas o láminas de forma superpuesta en la dirección del espesor, formándose así estructuras llamadas laminados.

Las fibras del material están embebidas en un aglutinante o matriz que distribuye los esfuerzos recibidos de las fibras y mantiene a éstas unidas.

Esta matriz tiene la responsabilidad de tolerar los daños sufridos y soportar los esfuerzos a fatiga que sufre el material compuesto.

Dentro de los compuestos reforzados por fibras, existen los compuestos laminados. Los compuestos laminados son materiales compuestos por dos materiales que contienen varias capas o láminas, unidas entre sí por medio de un adhesivo. Estos materiales pueden estar compuestos con materiales simples como metales para crear bimetales como los termostatos o pueden estar fabricados por laminados reforzados con fibras.

Los laminados están compuestos por dos partes. Cada lámina es un material compuesto de fibras reforzadas y está unida a otras láminas, formando así un compuesto laminado. Las láminas de este compuesto están dispuestas en diferentes orientaciones como se muestra en la Figura 4.1.1., lo que provoca que el compuesto tenga unas propiedades diferentes.

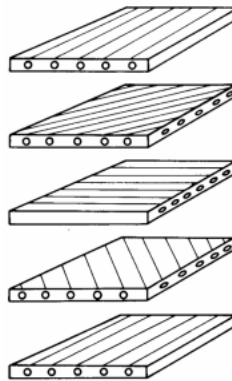


Figura 4.1.1. Compuesto laminado [23]

## 2. Compuesto reforzado con partículas:

Los compuestos reforzados con partículas [23], están compuestos por partículas de óxidos metálicos de 10 a 250 nm de diámetro. Estas partículas están dispuestas en una matriz de metal e interfieren con el deslizamiento de la matriz, lo que desencadena en unas buenas propiedades mecánicas en temperaturas elevadas, como bloquear el movimiento de las dislocaciones y producir un efecto pronunciado en el endurecimiento.

Algunos ejemplos de este tipo de material son el hormigón, el hormigón armado y distintos combustibles sólidos.

Para el desarrollo del proyecto, cabe mencionar que se utiliza el material compuesto reforzado por fibras. Además, para determinados escenarios se utilizan varias láminas de un material compuesto reforzado por fibras, por tanto, también serán utilizados los compuestos laminados.

## 4.2. Características de las fibras.

Como se ha comentado en el apartado anterior, el tipo de material compuesto utilizado es el reforzado con fibras y debido a ello, en este apartado se comentan diversos aspectos sobre la geometría de las fibras y cómo afecta en sus características en impactos balísticos.

En los materiales compuestos por fibras [24], sus propiedades dependen de parámetros microestructurales de las fibras como su longitud, diámetro, fracción en volumen u orientación de estas. Por ello, interesa conocer la topología de las fibras y ver cómo afectan a las propiedades del material.

En primer lugar, las fibras se pueden clasificar dependiendo de su longitud en dos tipos: fibras continuas y fibras cortas. Las fibras continuas son fibras con una alta longitud que se extiende a lo largo del material, mientras que las fibras cortas tienen una longitud limitada y se disponen aleatoriamente por la matriz del material.

Aunque los dos tipos de fibras tienen un papel destacado en la ingeniería de los materiales, para este proyecto se pretende utilizar las fibras continuas ya que presentan una ventaja notable en sus características mecánicas respecto a las fibras cortas. Algunas de sus características mecánicas más notables son: resistencia a tracción, fatiga y rigidez mayor, y distribución de una forma más eficiente las cargas.

Dentro de las fibras continuas existen dos tipos principales: las fibras unidireccionales y los tejidos. Los dos tipos de fibra son bastante utilizados en la industria de la protección balística y se debe comentar las diferencias y similitudes entre ellos para su elección.

Las fibras unidireccionales son fibras orientadas paralelamente entre sí que se extienden a lo largo de la pieza de material compuesto como se puede apreciar en la Figura 4.2.1. Esta configuración de material compuesto destaca por tener una fracción en volumen de fibras elevado. La fracción en volumen de fibras es igual al volumen de fibras existentes en el material entre el volumen total del compuesto, y su valor puede llegar a 0.7 en la realidad.

Este factor es importante debido a que está directamente relacionada con las propiedades mecánicas y cuanto mayor sea, mejores serán las propiedades mecánicas de las láminas, ofreciendo al material una mayor rigidez, resistencia y límite elástico.

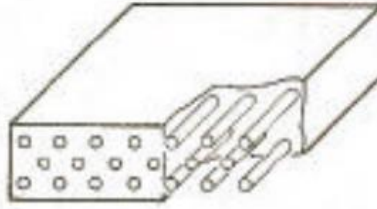


Figura 4.2.1. Configuración de fibras dispuestas paralelamente [24]

Por otra parte, el otro tipo principal de fibra continua son los tejidos, los cuales están formados por una matriz y un conjunto de fibras entrelazadas entre sí para formar hilos entrelazados en un orden determinado. En el conjunto de fibras entrelazadas existen dos tipos de fibras, la urdimbre que es la fibra que se dispone longitudinalmente, y la trama que se dispone de forma transversal.

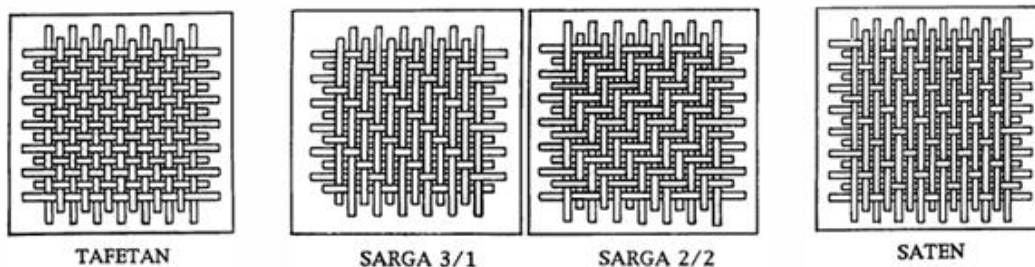


Figura 4.2.2. Tipos de tejidos [24]

Dentro de los entrelazados de los tejidos [24], como se muestra en la Figura 4.2.2., existen diversos tipos de configuraciones que aportan diferentes propiedades al material:

- Tafetán: esta configuración es una de las más utilizadas en la industria. Su entrelazado es bastante sencillo, las fibras se alternan arriba y abajo en las dos direcciones al producirse el cruce. Este tejido destaca por tener buena estabilidad con una buena porosidad para la resina.
- Sarga: el entrelazado de esta configuración es más complejo que el caso anterior, las fibras se cruzan arriba y debajo de forma aleatoria, mientras que la fibra continua se desplaza una fila arriba o abajo, lo que proporciona un patrón diagonal al tejido.

Las fibras de este tejido suelen tener un diámetro mayor que al combinarse con el patrón formado, resulta en un tejido más flexible y fuerte, pero con una menor estabilidad.

- Satén: el tejido es similar al tejido sarga, pero las fibras pasan de forma aleatoria por arriba de otras fibras, mientras que por abajo solo pasan una. Estos tejidos suelen destacar por poseer un alto gramaje y una alta flexibilidad.

El otro componente que forma los laminados es la matriz [24], la cual tiene diversas funciones que afectan al rendimiento del material compuesto. Una de las principales funciones es absorber la energía recibida por media de una carga y así, proteger a las fibras frente a daños mecánicos o químicos.

La interfase entre las fibras y la matriz desempeña un papel fundamental en el comportamiento del material y sobre todo en la transmisión de esfuerzos. Al obtener una interfase fuerte, aumenta la resistencia y la rigidez del material, aunque la tenacidad de este disminuye. Por otra parte, es fundamental tener una interfase fuerte para tener una excelente resistencia a la corrosión y a la humedad.

Los tejidos se diferencian de las fibras continuas unidireccionales en varios aspectos. En primer lugar, los tejidos tienen un volumen en fracción menor y en él existen curvaturas, por tanto, tienen unas propiedades mecánicas inferiores.

Para el impacto balístico de este proyecto se escoge las fibras tejidas debido a que tener un gran índice de ondulación mejora la resistencia a impactos. Por último, cabe mencionar que es preferible la utilización de fibras con un diámetro mayor para resistir de una manera más eficiente las sollicitaciones cortantes que existen durante los impactos balísticos.

### 4.3. Materiales Ortótropos

Para poder describir el comportamiento de los materiales ortótropos, es necesario utilizar un método específico. Por ello, en esta sección se examina como describir las propiedades elásticas de estos materiales.

Para describir el comportamiento elástico de los materiales [25], [11], se recurre a la ley de Hooke generalizada. La ley de Hooke determina que la deformación de un material es directamente proporcional a la tensión aplicada dentro del límite elástico del material.

Los materiales ortótropos son un tipo específico de materiales anisótropos y su comportamiento está presente en una gran cantidad de materiales compuestos reforzados con fibras. La particularidad de estos materiales es que poseen 3 planos de simetría con propiedades distintas cada uno.

Para calcular las propiedades elásticas del material ortótropo, es indispensable aplicar la ley de Hooke generalizada específica para este tipo de material. Esta ley generalizada se expresa mediante una matriz de flexibilidad que relaciona las tensiones y las deformaciones en las tres direcciones principales: longitudinal, transversal y normal.

Es importante destacar que, en cada una de las direcciones, los valores de las propiedades cambian debido a que el material es ortótropo. La matriz de flexibilidad que se muestra en la ecuación 1, incluye implícitamente los módulos de elasticidad, los coeficientes de Poisson y los módulos de corte para cada una de las direcciones principales.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{32} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Como se muestra en la matriz de flexibilidad, se aprecia la relación entre las deformaciones y las tensiones sufridas. Los parámetros de tensión y deformación son independientes y a partir de ellos se puede calcular el resto de los coeficientes de la matriz. También se visualizan los coeficientes de flexibilidad  $S_{ij}$ , los cuales son funciones referidas a constantes elásticas. Mediante estos coeficientes se pueden determinar diversas constantes ingenieriles.

Los subíndices  $ij$  representan las direcciones tomadas dentro de un sistema de referencia orientado tridimensional y ortogonal. En la Figura 4.3.1., se muestra qué sistema de coordenadas tridimensional se utiliza, donde la dirección 1 hace referencia a la dirección de las fibras, la dirección 2 es transversal dentro del plano de la lámina y la dirección 3 es el espesor del material o laminado.

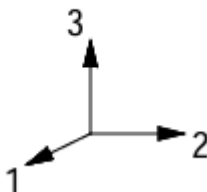


Figura 4.3.1. sistema de coordenadas [24]

Las constantes ingenieriles que resultan son módulo elástico o de *Young* ( $E_{ij}$ ), coeficiente de *Poisson* ( $\nu_{ij}$ ) y módulo de cizalladura ( $G_{ij}$ ). Estas constantes elásticas se sustituyen en la matriz de flexibilidad en función de los coeficientes de flexibilidad para resultar la siguiente matriz:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Una vez obtenida la matriz que relaciona las deformaciones y tensiones con las propiedades elásticas del material, es posible calcular sus propiedades bajo cargas específicas. Esta matriz permite determinar cómo responderá el material a diferentes tipos de esfuerzo y carga.

El enfoque de la ley de Hooke no sólo facilita la predicción del rendimiento del material, sino que también optimiza el diseño y la fabricación de componentes compuestos. Por lo tanto, el uso de la teoría de elementos finitos es fundamental en la ingeniería de materiales compuestos, proporcionando una base sólida para el desarrollo de soluciones eficientes en la industria de materiales avanzados.

#### 4.4. Modelos de daño para materiales compuestos

Para comprender el comportamiento de los materiales compuestos, es crucial examinar los diversos modelos de daño disponibles. Estos modelos permiten simular y predecir cómo se fracturan los materiales compuestos bajo diversas cargas. Gracias a ello, es posible replicar los mecanismos de fractura con una gran precisión, lo que facilita la evolución de resistencia y durabilidad de los materiales compuestos.



Por tanto, en este capítulo se exponen 3 de los modelos de daño tridimensionales en materiales compuestos más empleados.

#### 4.4.1. Modelos de Tsai-Hill y Tsai-Wu

Los dos modelos fueron de los primeros modelos en desarrollarse, y su criterio se basa en una única función polinómica basada en las tensiones para definir cuando se produce el fallo. Cuando se produce el fallo, estos modelos no diferencian entre el fallo de fibras y de la matriz, y están basados en el fallo dúctil de los materiales ortótropos.

A continuación, se muestra una explicación de los dos modelos:

- **Modelo de Tsai-Hill [10], [7]:** el criterio de daño de Tsai-Hill es uno de los modelos más utilizados para evaluar el fallo en materiales compuestos. Este modelo se originó con el científico Hill, quien aplicó el criterio de la energía de von Mises a materiales anisótropos, y posteriormente Tsai lo adaptó a una capa ortótropa unidireccional para desarrollarlo.

Este criterio de daño se basa en la energía que considera la interacción entre los componentes de tensión y deformación. La expresión que define este modelo se presenta en la siguiente ecuación:

$$F = \frac{1}{2X^2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + \left( \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{2X^2} \right) (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} \quad (3)$$

Donde X e Y hacen referencia a las resistencias en las direcciones de la fibra y matriz, respectivamente, y  $S_{12}$  y  $S_{23}$  son las resistencias a cortadura en los diferentes planos.

- **Modelo Tsai-Wu [1], [3]:** El criterio de fallo de Tsai-Wu es una ampliación del criterio de Tsai-Hill, diseñado para aumentar la precisión en la predicción del fallo en materiales compuestos. La teoría de Tsai-Wu se basa en un criterio de fallo polinómico, utilizando el tensor de tensiones clásico para evaluar la resistencia de materiales anisótropos. Inicialmente, este criterio empleaba una expresión polinómica cuadrática de las tensiones con coeficientes tensoriales, como una versión simplificada del modelo de Gol'denblat y Kopnov, que fue el primer criterio de fallo basado en tensores.

El criterio de fallo de Tsai-Wu se utiliza ampliamente en el diseño y análisis de fallos en estructuras compuestas, gracias a su simplicidad y alta precisión. La versión simplificada de este modelo se presenta en la ecuación 4:

$$F = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + (2F_{22} - F_{44})\sigma_2\sigma_3 + 2F_{12}\sigma_1(\sigma_2 + \sigma_3) + F_{44}\tau_{23}^2 + F_{66}(\tau_{21}^2 + \tau_{31}^2) \quad (4)$$

Donde los coeficientes  $F_{ij}$ , son funciones de las tensiones de rotura las cuales varían según si las cargas a las que están sometidas son de compresión o de tracción.

#### 4.4.2. Modelo de Hashin

El modelo de daño Hashin [13], formulado en 1973 por Hashin y Rotren, es un método utilizado para analizar el comportamiento de fallo en los materiales compuestos, especialmente en las fibras reforzadas. En especial, para este trabajo se ha utilizado el modelo de daño de Hashin en tres dimensiones.

El criterio establece diversas funciones basadas en las tensiones del material para cada uno de los mecanismos que provocan el fallo:

- Rotura de fibras a tracción:  $\sigma_{11} > 0$

$$e_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \quad (5)$$

- Roturas de fibras a compresión:  $\sigma_{11} < 0$

$$e_{fc} = \frac{|\sigma_{11}|}{X_c} \quad (6)$$

Donde  $X_c$  es la resistencia a compresión en la dirección de la fibra.

- Rotura de matriz a tracción:  $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) > 0$

$$e_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_t}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} \quad (7)$$

Donde  $Y_t$  es la resistencia a tracción en dirección perpendicular a las fibras.

- Rotura de matriz a compresión:  $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) < 0$

$$e_{mt} = \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22} + \sigma_{23}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23}}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} \quad (8)$$

Donde  $Y_c$  es la resistencia a compresión en dirección perpendicular a las fibras.

Según este modelo, el material se comporta como un ortótropo elástico hasta que cualquier fallo alcance el valor  $e_i = 1$ . Cuando alcanza este valor, el material pierde su capacidad de resistencia en la dirección de la tensión principal para cada mecanismo de fallo.

#### 4.4.3. Modelo de Puck

El criterio de daño, desarrollado por Puck en 1969 [12], [27], se estableció sobre las bases del criterio de fallo de Hashin. Este modelo se distingue por analizar de forma separada los mecanismos de fallo en las fibras y el fallo entre fibras. La principal ventaja de este criterio fue su precisa modelización del fallo de la matriz. De este modo, el criterio de Puck es capaz de predecir tanto la ubicación como el ángulo de fractura de una grieta.

A continuación, se muestra el criterio de daño de Puck en 3 dimensiones, donde la expresión del ángulo de fractura es:

$$\theta_f = \frac{1}{2} * \cos^{-1} * \left(\frac{-p_{11}^c}{1 + p_{11}^c}\right) \quad (9)$$

Donde  $p_{\perp\perp}^c$  es el parámetro de inclinación y su valor viene determinado en función del material empleado. Con la obtención del ángulo de inclinación, se calculan las tensiones implicadas en el análisis: [puck 3]

$$\sigma_n(\theta) = \sigma_2 * \cos^2\theta + \sigma_3 * \sin^2\theta + 2\tau_{23} * \cos\theta * \sin\theta \quad (10)$$

$$\tau_{nt}(\theta) = (\sigma_3 - \sigma_2) * \sin\theta * \cos\theta + \tau_{23} * (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \quad (11)$$

$$\tau_{nl}(\theta) = \tau_{31} * \sin\theta + \tau_{21} * \cos\theta \quad (12)$$

En la mayoría de los casos [13], la carga que se aplica en las simulaciones implica a las tres tensiones en el plano de fractura y por ello, habrá diferentes combinaciones. Otro aspecto importante es que habrá una diferencia sustancial entre las tensiones que vendrá determinada por la tensión  $\sigma_n$ . La tensión se evaluará de distinta forma si es positiva o negativa por las siguientes expresiones:

- $\sigma_n(\theta) \geq 0$ :

$$f_E(\theta) = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_{\perp}^t} - \frac{p_{\perp\psi}^t}{R_{\perp\psi}^A}\right) * \sigma_n(\theta)\right]^2 + \left(\frac{\tau_{nt}(\theta)}{R_{\perp\perp}^A}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{nl}(\theta)}{R_{\perp\parallel}}\right)^2} + \frac{p_{\perp\psi}^t}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n(\theta) \quad (13)$$

- $\sigma_n(\theta) < 0$ :

$$f_E(\theta) = \sqrt{\left(\frac{p_{\perp\psi}^c}{R_{\perp\psi}^A} * \sigma_n(\theta)\right)^2 + \left(\frac{\tau_{nt}(\theta)}{R_{\perp\perp}^A}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{nl}(\theta)}{R_{\perp\parallel}}\right)^2} + \frac{p_{\perp\psi}^c}{R_{\perp\psi}^A} * \sigma_n(\theta) \quad (14)$$

Donde:

$$\frac{p_{\perp\psi}^t}{R_{\perp\psi}^A} = \frac{p_{\perp\perp}^t}{R_{\perp\perp}^A} * \cos^2\psi + \frac{p_{\perp\parallel}^t}{R_{\perp\parallel}^A} * \sin^2\psi \quad (15)$$

$$\frac{p_{\perp\psi}^c}{R_{\perp\psi}^A} = \frac{p_{\perp\perp}^c}{R_{\perp\perp}^A} * \cos^2\psi + \frac{p_{\perp\parallel}^c}{R_{\perp\parallel}^A} * \sin^2\psi \quad (16)$$

$$R_{\perp\perp}^A = \frac{R_c}{2 * (1 + p_{\perp\perp}^c)} \quad (17)$$

En las expresiones entra en escena el ángulo de tensión resultante a cortadura que se obtiene mediante:

$$\cos^2\psi = \frac{\tau_{nt}^2}{\tau_{nt}^2 + \tau_{nl}^2} \quad (18)$$

$$\sin^2\psi = \frac{\tau_{nl}^2}{\tau_{nt}^2 + \tau_{nl}^2} \quad (19)$$

El fallo en las fibras del material viene determinado por la expresión:

$$f_{FF} = \frac{1}{\pm R_{\parallel}^{t,c}} * \left[ \sigma_1 - \left( v_{\perp\parallel} - v_{\perp\parallel f} * m_{\sigma f} * \frac{E_{\parallel}}{E_{\parallel f}} \right) * (\sigma_2 + \sigma_3) \right] \quad (20)$$

$$\text{Con } \begin{cases} R_{\parallel}^t & \text{si } [...] \geq 0 \\ -R_{\parallel}^c & \text{si } [...] < 0 \end{cases}$$

Donde  $R_{\parallel}^{t,c}$  son las resistencias del material en dirección paralela a las fibras, el subíndice  $\parallel$  es dirección paralela a las fibras y  $\parallel f$  es la dirección longitudinal de las fibras.

## 4.5. Método de los elementos finitos

En la actualidad, existen numerosos problemas de ingeniería y ciencia que necesitan métodos para su resolución. Uno de los métodos de cálculo más utilizado es el método de los elementos finitos (MEF) que es una técnica numérica ampliamente utilizada en una amplia gama de sectores, como la mecánica estructural, la transferencia de calor o la dinámica de fluidos. Este método se ha convertido en una herramienta esencial para el análisis y diseño de sistemas con una gran complejidad. Por otro lado, es una herramienta básica en el cálculo estructural lo que la convierte en una metodología perfecta para la realización de este proyecto.

El método de los elementos finitos surgió en la década de 1940 [9], cuando el matemático Richard Courant propuso un enfoque para resolver ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Sin embargo, no fue hasta la década de 1950 cuando se mostraron los avances necesarios que sentaron las bases del MEF moderno. A partir del asentamiento de las bases, hasta la actualidad, numerosos científicos y matemáticos han estado desarrollando y ampliando este método hasta convertirlo en una herramienta precisa y de alta calidad para los problemas cotidianos de la ingeniería.

El método de elementos finitos es una técnica empleada para abordar problemas complejos, como los que se encuentran en mecánica estructural y en el análisis de sólidos. Estos problemas se pueden describir utilizando ecuaciones diferenciales donde las incógnitas son campos de desplazamiento, deformación y tensión. Sin embargo, es posible formular el problema enfocándose en uno de los campos y calcular el resto a partir de las ecuaciones de la teoría de la elasticidad.

Antes del planteamiento de las ecuaciones, el método de los elementos finitos comienza con la discretización del dominio continuo en pequeñas subregiones o elementos simples, creando una malla del cuerpo a analizar. Estos elementos, de diferentes formas geométricas, tienen nodos en los que se calcula la solución del problema. La selección del tamaño y forma de los elementos es crucial: elementos más pequeños capturan con mayor precisión los detalles de la solución, mientras que elementos más grandes reducen el costo computacional.

Tras la discretización, se definen las conocidas funciones de forma, que aproximan la variación de las variables del problema dentro de cada elemento. Estas funciones interpolan los valores entre los nodos, determinando la solución aproximada dentro de cada elemento.

A continuación, se formula el problema global basándose en las ecuaciones de equilibrio. En este caso, se emplea el principio de la elasticidad y se centra en el planteamiento en desplazamientos mediante el principio de mínima energía

potencial total. Para un cuerpo elástico sometido a fuerzas, la energía potencial total es la suma de la energía de deformación y la energía debida a las fuerzas aplicadas, conocida como el Teorema de la Energía Potencial Total Mínima.

El Teorema de la Energía Potencial Total Mínima se puede establecer en base a los desplazamientos en los tres ejes principales, que satisfacen las ecuaciones diferenciales de equilibrio y las condiciones de contorno, por lo que dan un mínimo para la energía potencial total en comparación con cualquier otro campo de desplazamientos que satisfaga las mismas condiciones.

Si la energía potencial total se expresa en desplazamientos, llamados  $u$ ,  $v$  y  $w$ , el principio de mínima energía potencial resulta:

$$\delta\Pi(u, v, w) = \delta\Pi(u, v, w) - \delta W_p(u, v, w) = 0 \quad (21)$$

Si se considera un cuerpo elástico lineal que soporta un conjunto de cargas conservativas, con un dominio  $V$  y un contorno  $S$ , la expresión de la energía potencial total es:

$$\Pi_p = \int_V \left( \frac{1}{2} \varepsilon^T D \varepsilon - \varepsilon^T D \varepsilon_0 + \varepsilon^T \sigma_0 \right) dV - \int_V u^T b dV - \int_S u^T t dS - U^T P \quad (22)$$

Donde  $b$  son las fuerzas volumétricas,  $t$  las fuerzas superficiales. Los desplazamientos en las direcciones principales  $x$ ,  $y$ ,  $z$  se representan mediante  $u = \{u, v, w\}$ . El termino final de la ecuación,  $-U^T P$  tiene en cuenta el trabajo realizado por las fuerzas puntuales aplicadas.

El campo de desplazamientos  $u$ ,  $v$  y  $w$  que minimiza la energía potencial total y satisface las condiciones de contorno de desplazamientos es el campo de desplazamientos correspondiente al equilibrio, es decir a la solución del problema. Por lo tanto, cuando se utilice el principio de mínima energía potencial total en elementos finitos, se supondrá una forma para el campo de desplazamientos dentro de cada elemento y se utiliza el funcional  $\Pi_p$  para encontrar las ecuaciones de comportamiento de cada elemento.

Por último, cabe destacar que las ecuaciones de equilibrio que se consideran se cumplen de forma global, para el mallado entero, pero de manera local, para cada elemento, se cumplirán de manera aproximada.

## 5. Desarrollo del modelo

Tras estudiar los tipos de materiales compuestos y la influencia de la teoría de elementos finitos en estos, se procede al desarrollo del modelo numérico para la simulación de impactos balísticos. En este apartado se muestra el proceso que se ha llevado a cabo para la simulación.

En primer lugar, los modelos numéricos y la simulación de estos, se lleva a cabo mediante el *software* Abaqus. Abaqus es un programa de análisis por elementos finitos que se utiliza para simular y analizar el comportamiento de geometrías que están dispuestas bajo diversas cargas.

Para la simulación de un impacto balístico a alta velocidad en Abaqus, se han desarrollado dos modelos numéricos diferentes y en cada uno se realizan varias simulaciones. Para la simulación de impactos balísticos se emplea el método Abaqus/Explicit, un método de cálculo del *software*, el cuál está explicado en el Apéndice 1.

El primer modelo numérico consta de una placa plana con un sistema de amortiguamiento. En él se pretende analizar la respuesta de la placa frente a un impacto, la energía absorbida y la deformación sufrida por el sistema de amortiguación interno. El segundo modelo numérico consta del desarrollo de la geometría de una calota de un casco de combate. Esta geometría, que está pensada para sustituir un casco de combate, se somete a diferentes impactos desde distintas posiciones, siguiendo la normativa anteriormente comentada.

### 5.1. Modelo numérico placa plana con sistema interior

Con el fin de optimizar los ensayos balísticos y estudiar el rendimiento de un material compuesto, se ha desarrollado un modelo numérico de una placa plana para analizar su comportamiento frente a impactos balísticos de alta velocidad con un calibre pequeño. El objetivo principal de este modelo es evaluar la respuesta de un material compuesto frente a un impacto en una geometría plana y simple.

La placa plana de pruebas está compuesta de 4 láminas que representan las diferentes capas de un material compuesto. Aunque en los modelos de cascos suelen tener un elevado número de capas, en torno a 16 láminas, se han seleccionado 4 para reducir el cálculo computacional de una malla muy detallada. Las dimensiones de cada lámina son de 100x100x2.5 mm y la geometría se muestra en la Figura 5.1.1.



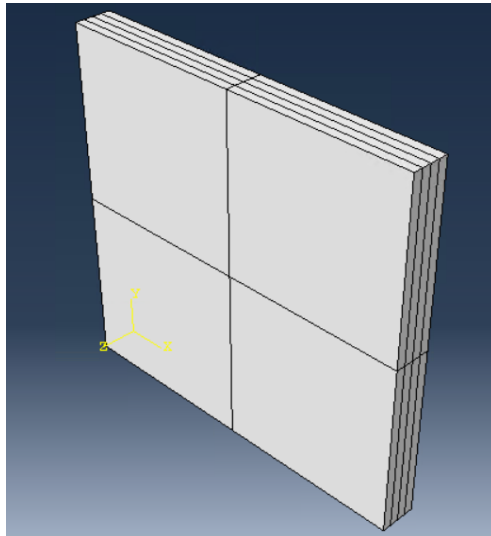


Figura 5.1.1. Placa plana

Para este modelo numérico se seleccionan tres materiales compuestos. Las propiedades elásticas y de fallo de los materiales se exponen en la Tabla 5.1.1.

Para la definición de las propiedades de fallo en el programa Abaqus, ha sido necesaria la utilización de una subrutina de fallo del modelo de Hashin en tres dimensiones. Este procedimiento ha sido llevado a cabo debido a que el *software* está capacitado para calcular el criterio de daño de Hashin hasta en dos dimensiones, mientras que para nuestro estudio son necesarias tres dimensiones. Una explicación detallada del modelo de daño en el que está basada la subrutina empleada se puede visualizar en el Apéndice I.

#### UHMWPE [17]

<b>Propiedades elásticas</b>					
<b><math>E_1</math> (MPa)</b>	<b><math>E_2</math> (MPa)</b>	<b><math>E_3</math> (MPa)</b>	<b><math>\nu_{12}</math></b>	<b><math>\nu_{13}</math></b>	<b><math>\nu_{23}</math></b>
34257	34257	3620	0	0.013	0.013
<b><math>G_{12}</math> (MPa)</b>	<b><math>G_{13}</math> (MPa)</b>	<b><math>G_{23}</math> (MPa)</b>			
173.8	547.8	547.8			
<b>Propiedades de fallo</b>					
<b><math>X_t</math> (MPa)</b>	<b><math>S_{12}</math> (MPa)</b>	<b><math>S_{23}</math> (MPa)</b>	<b><math>S_{31}</math> (MPa)</b>		
1150	120	574	574		

Tabla 5.1.1. Propiedades UHMWPE

**Kevlar [20]**

<b>Propiedades elásticas</b>					
$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$E_3$ (MPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
18500	18500	6000	0.25	0.33	0.33
$G_{12}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)			
770	5430	5430			
<b>Propiedades de fallo</b>					
$X_t$ (MPa)	$S_{12}$ (MPa)	$S_{23}$ (MPa)	$S_{31}$ (MPa)		
1850	77	77	77		

Tabla 5.1.2. Propiedades Kevlar

**Fibra de carbono [20]**

<b>Propiedades elásticas</b>					
$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$E_3$ (MPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
132580	10800	10800	0.24	0.24	0.49
$G_{12}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)			
5700	5700	3400			
<b>Propiedades de fallo</b>					
$X_t$ (MPa)	$S_{12}$ (MPa)	$S_{23}$ (MPa)	$S_{31}$ (MPa)		
1520	89.9	67.6	67.6		

Tabla 5.1.3. Propiedades fibra de carbono

Por otra parte, para simular un sistema de amortiguamiento interior existente en los cascos de combate, se añade una geometría en la zona posterior de las láminas. Este sistema de amortiguación desempeña un papel fundamental al amortiguar la energía recibida por el impacto, ayudando así disminuir los posibles traumas sufridos.

El material seleccionado para hacer la función de espuma es una gelatina balística y para su modelado en el programa Abaqus, se necesita utilizar la función Hyperelastic. En la Tabla 5.1.4. se muestran los parámetros del material utilizados para su correcta modelización en Abaqus.

**Gelatina balística [29]**

<b>Propiedades Hiperelásticas</b>		
$C_{10}$ (MPa)	$C_{01}$ (MPa)	$D_1$ (MPa)
0	$8.327 \cdot 10^{-5}$	$8.30 \cdot 10^{-4}$

Tabla 5.1.4. Propiedades gelatina balística

Los materiales hiperelásticos son un tipo de material que puede soportar grandes deformaciones y que tienen unas propiedades elásticas no lineales. Al no tener un comportamiento lineal, sus propiedades se definen a partir del potencial de energía proveniente de la deformación acumulada en el material por unidad de volumen.

Existen distintos métodos para el cálculo de su potencial de energía [5], pero en nuestro caso se define por el método de Mooney-Rivlin. Este método utilizado para materiales hiperelásticos describe la relación entre la tensión y deformación sufrida por este tipo de materiales. Se basa en una combinación de dos invariantes algebraicos del tensor de deformación.

La función del cálculo del potencial de energía viene dada por la siguiente ecuación:

$$U = C_{10} * (I_1 - 3) + C_{01} * (I_2 - 3) + \frac{1}{D_1} * (J_{el} - 1)^2 \quad (23)$$

Donde:

- $C_{10}$ ,  $C_{01}$  y  $D_1$  son constantes del material que dependen de la temperatura y se proporcionan a través de ensayos experimentales.
- $U$  es la energía de deformación por unidad de volumen.
- $I_1$  y  $I_2$  son los invariantes del tensor de deformación. Estos invariantes vienen definidos por:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (24)$$

$$I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} \quad (25)$$

Los parámetros  $\lambda$  son los alargamientos en las direcciones principales.

- $J_{el}$  es la relación de volumen elástico dependiente de la expansión térmica.

Tras visualizar las propiedades y características de los materiales que se utilizan en este modelo numérico, falta mostrar las condiciones de contorno que se han especificado para esta simulación.

En esta simulación, se restringen el movimiento y la rotación de algunas partes de la geometría. En la parte posterior del modelo, como se visualiza en la Figura 5.1.2., se restringe el movimiento y la rotación en z. Con ello, se pretende estudiar la deformación resultante en la espuma que actúa como sistema de amortiguamiento, y predecir si la deformación puede provocar un trauma en el portador del casco.

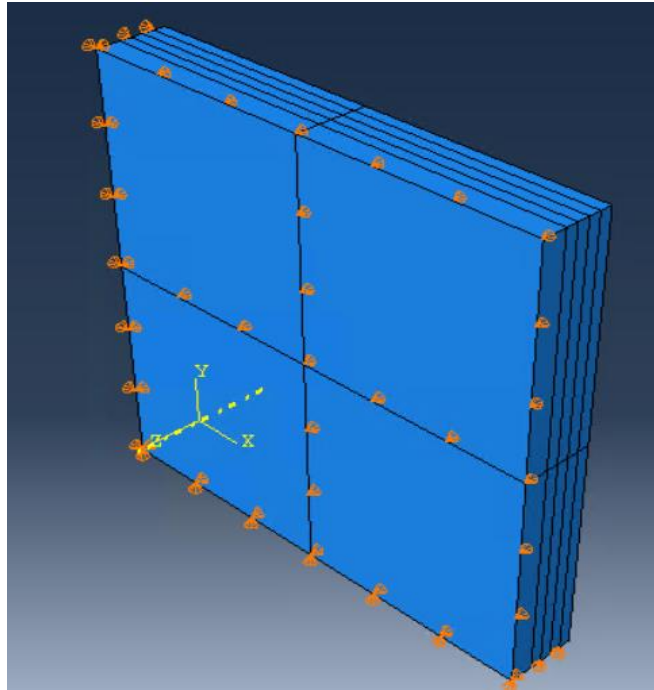


Figura 5.1.2. Restricciones de movimiento en placa

Por otra parte, para que a la hora de simular este modelo numérico la placa y la espuma no se separen, se ha implementado una restricción tipo TIE para unir estos dos componentes. Además, para disminuir el costo computacional de las simulaciones, se ha creado un modelo con simetría un cuarto, tanto la placa como el proyectil, como se muestra en el montaje de la Figura 5.1.3. Por otra parte, en la Figura 5.1.4. se muestra el mallado de la placa para las simulaciones.

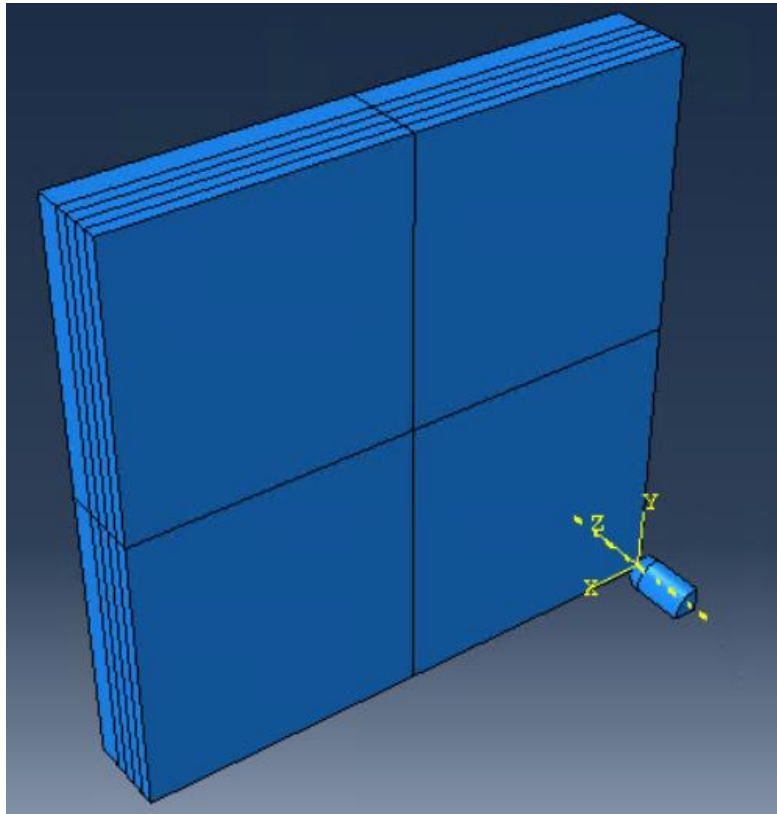


Figura 5.1.3. Montaje de las simulaciones en placa

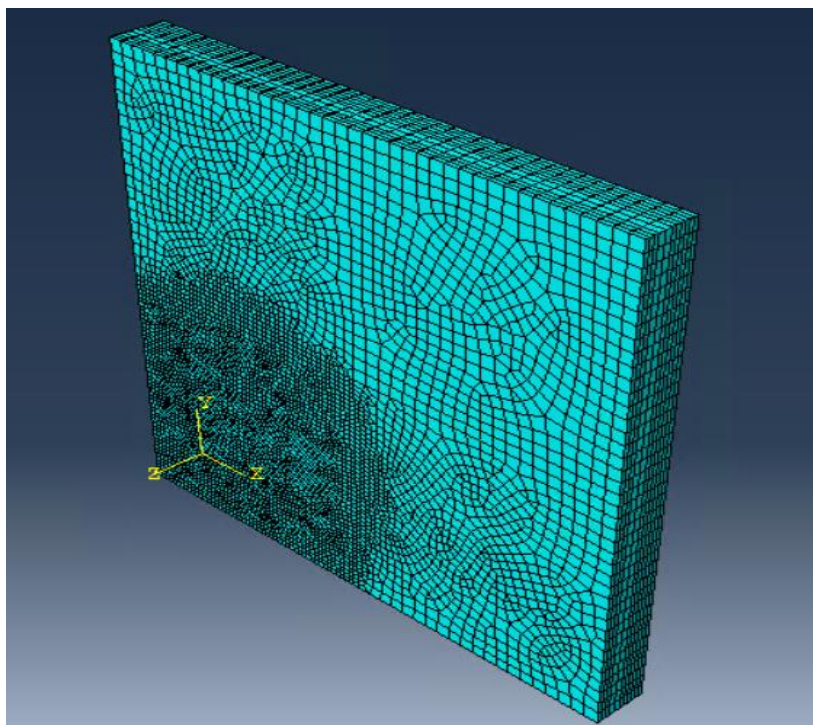


Figura 5.1.4. Mallado de la placa

## 5.2. Modelo numérico casco balístico

Tras el estudio de impacto en placas de laminado es necesario realizar un impacto balístico sobre una geometría más compleja y con una curvatura notable, con el fin de asemejarse a un casco de combate. Por ello, se ha modelado numéricamente un casco de combate tomando en cuenta las dimensiones de la geometría de una cabeza.

El modelo numérico está formado por una única capa de material compuesto, puesto que se pretende simular un único tejido con grandes dimensiones, y analizar como este tejido responde a las cargas sometidas. En la Figura 5.2.1., se aprecia la geometría resultante del modelo y cabe mencionar que el espesor de este modelo es el mismo que el de la placa plana. Esto es debido a que se busca estudiar cómo influye la perforación de un proyectil en diferentes configuraciones de un mismo material.

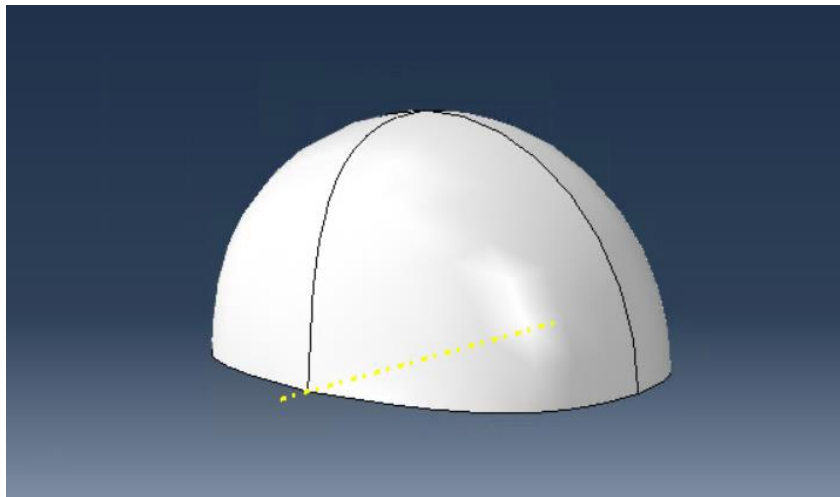


Figura 5.2.1. Geometría calota

Para las simulaciones, se han escogido dos materiales compuestos diferentes para el casco de combate. Estos materiales son el UHMWPE y la fibra de carbono. Las propiedades de estos materiales se muestran en las Tablas 5.1.1 y 5.1.3., situado en el apartado del modelo numérico de la placa plana. La selección de estos materiales se debe a que en los ensayos del modelo numérico de la placa plana de pruebas han dado unos resultados bastante óptimos comparados con el tercer material disponible.

Cabe mencionar que para este modelo no se utiliza ningún tipo de sistema de amortiguamiento debido a la falta de tiempo para su desarrollo numérico. Por otra parte, las condiciones de contorno existentes en este modelo tienen una complejidad mínima. Como se muestra en la Figura 5.2.2., se restringen en la base de la geometría, el movimiento y rotación en las direcciones principales X, Y y Z. El fin de esta restricción es simular que el casco está perfectamente abrochado, por lo que no debería de sufrir ningún desplazamiento respecto a la cabeza del usuario.

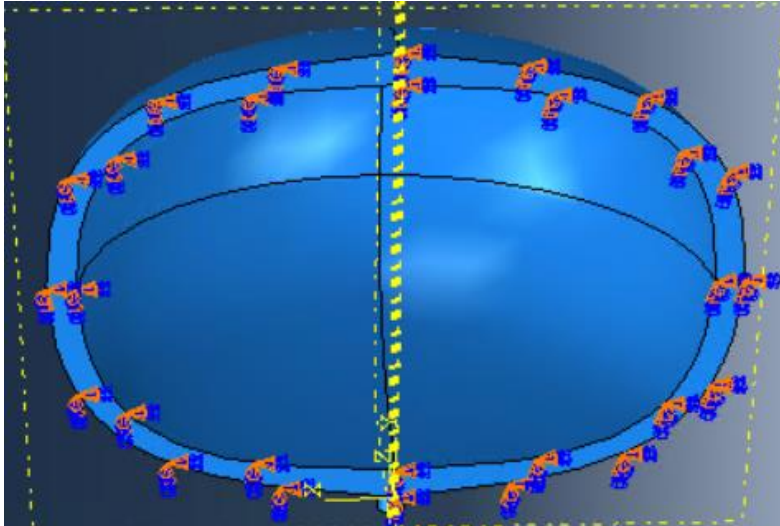


Figura 5.2.2. Restricción de la calota

Para llevar a cabo el estudio, se ha realizado simulaciones con un impacto balístico desde el lateral del casco de combate, siguiendo la normativa NIJ referente a los planos donde se deben realizar los impactos. En la Figura 5.2.3. se puede visualizar el modelo numérico cuando se expone a la simulación de impacto lateral.

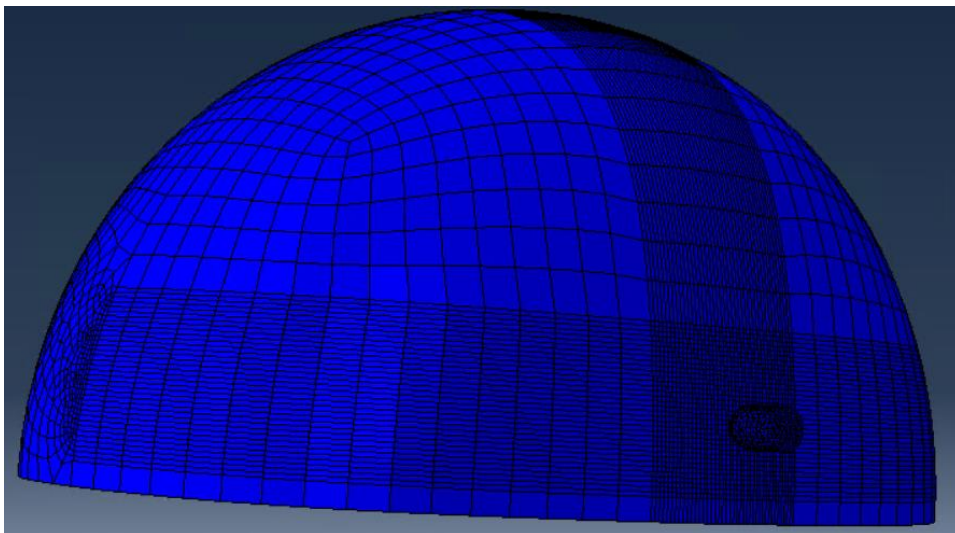


Figura 5.2.3. Impacto lateral

### 5.3. Modelo numérico proyectil

Para la simulación de un impacto balístico es esencial la utilización de un proyectil. Para el presente proyecto, se busca el ensayo de impactos de bajo calibre, siguiendo la normativa aplicable, por ello se ha modelado una bala del calibre 9 mm, siguiendo las indicaciones de estandarización que se muestran en la normativa Nato.

En el desarrollo del modelo del proyectil, se omite el modelado del casquillo de la bala de 9 mm puesto que, para la simulación del impacto, este elemento no entra en contacto con la superficie del casco y no desempeña ningún papel relevante. En la Figura 5.3.1. se visualiza la geometría del proyectil modelado.

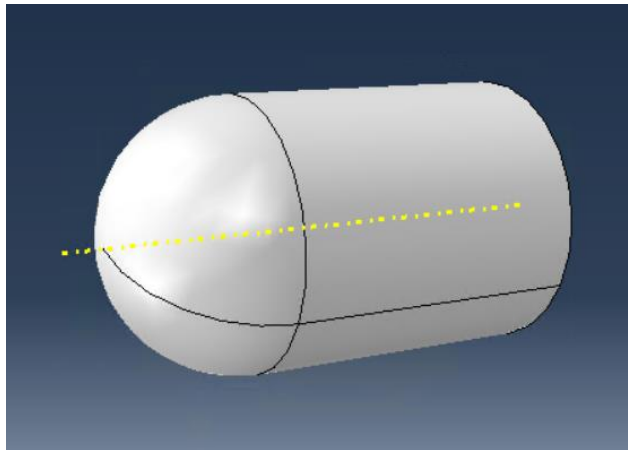


Figura 5.3.1. Proyectil de 9 mm

Para las simulaciones, el material escogido para el proyectil es un latón. El latón es un material comúnmente utilizado en esta industria y la mayoría de los ejércitos poseen un armamento de munición de este material. Las propiedades elásticas y criterios de fallo de este material se pueden visualizar en la Tabla 5.3.1.

Para definir su criterio de fallo en el programa Abaqus, se emplea el modelo de Johnson-Cook. El modelo Johnson-Cook es un modelo que describe el comportamiento plástico y la fractura de los materiales metálicos frente a cargas dinámicas en las que el material sufre altas deformaciones y tensiones. Este modelo es bastante utilizado en simulaciones dinámicas de alta velocidad, por ello se ha escogido para el proyecto. [5].



El modelo de Johnson-Cook viene determinado por la siguiente ecuación:

$$\bar{\sigma} = (A + B * \bar{\epsilon}^n) * \left[ 1 + C * \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \right] * \left[ 1 - \left(\frac{(T - T_a)}{(T_m - T_a)}\right)^m \right] \quad (26)$$

Donde:

- $\bar{\sigma}$ : tensión plástica equivalente
- $\bar{\epsilon}$ : deformación plástica equivalente
- $\dot{\bar{\epsilon}}$ : tasa de deformación plástica equivalente
- $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ : tasa de deformación plástica de referencia
- $T$ : temperatura del material
- $T_a$ : temperatura ambiente
- $T_m$ : temperatura de fusión del material
- $n$ : coeficiente de endurecimiento por deformación
- $m$ : coeficiente de ablandamiento térmico
- $A, B$  y  $C$ : constantes del material obtenidas experimentalmente

Dentro de la ecuación, el término  $(A + B * \bar{\epsilon}^n)$  describe el endurecimiento por deformación, el término  $\left[ 1 + C * \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \right]$  describe la sensibilidad de la velocidad de deformación, y el término  $\left[ 1 - \left(\frac{(T - T_a)}{(T_m - T_a)}\right)^m \right]$  describe el ablandamiento térmico del material.

### Latón [16]

<b>Modelo Johnson-Cook</b>					
$A$ (MPa)	$B$ (MPa)	$n$	$m$	$T_a$ (K)	$T_m$ (K)
112	505	0.42	1.68	293	1793
<b>Daño de Johnson-Cook</b>					
$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	
0.54	4.89	0.014	3.03	1.12	
<b>Propiedades elásticas</b>					
$E$ (MPa)	$\nu$				
$100 \cdot 10^3$	0.33				

Tabla 5.3.1. Propiedades latón

## 6. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en los distintos modelos numéricos de elementos finitos desarrollados. La finalidad de este apartado es analizar, comparar y aprender mediante los resultados obtenidos.

En primer lugar, se muestra el análisis de un impacto balístico sobre el modelo de la placa plana de pruebas. En este caso se analiza cómo varía la respuesta al impacto dependiendo de diversos factores para su diseño. Los factores que se han modificado son el refinado de la malla, las configuraciones de las láminas y cómo influye la variación de peso. Con este caso se pretende analizar cómo cambia la respuesta al impacto y estudiar qué parámetros son los más adecuados para el diseño y fabricación de sistemas de protección.

En segundo lugar, tras analizar las mejores soluciones del caso anterior, se analiza el impacto a alta velocidad sobre el modelo de la placa plana, sometiendo a simulación a tres materiales distintos. En este caso se busca comprobar si los materiales soportan la velocidad nominal de la bala según marca la normativa previamente comentada. Si el material dispuesto a ensayo no resiste el impacto, se estudia a partir de qué velocidad logra resistir el impacto.

Finalmente, tras estudiar los diferentes materiales empleados en las simulaciones, se escogen los dos materiales que tengan unas mejores cualidades para soportar los impactos balísticos. Con los dos materiales escogidos, se simula un impacto balístico sobre el modelo numérico del casco de combate. En este caso, se realiza un impacto desde la parte lateral del casco y se analizará su respuesta.

### 6.1. Estudio 1: simulaciones sobre placa. Efecto malla elementos finitos y configuración de laminado

Para obtener una comprensión más profunda del proceso de diseño y fabricación de los equipos de protección, es fundamental analizar cómo diferentes factores pueden influir en los resultados finales. En este contexto, se realiza un estudio detallado que aborda la influencia del mallado y cómo distintas configuraciones afectan al rendimiento de las láminas. Con este estudio se pueden identificar las variables críticas que pueden llegar a optimizarse para mejorar su rendimiento frente a las condiciones a las que están sometidos.

### 6.1.1. Influencia del mallado

En los programas de simulación por elementos finitos, el mallado de los modelos numéricos cobra una especial relevancia, ya que la precisión y eficiencia de los resultados de las simulaciones, dependen en gran medida de la malla generada.

Con una malla más refinada, los resultados obtenidos son más precisos y en especial en zonas críticas donde se producen cambios bruscos de geometría o en regiones donde la solución va a sufrir grandes variaciones, debido a estar sometida la geometría a diversas cargas. Aunque refinar la malla ofrece unos resultados más precisos, requieren un mayor tiempo de cálculo del programa y un mayor coste computacional.

En este apartado, se investiga cómo el refinamiento de una malla afecta los resultados de simulaciones, cuando se encuentra sometida a diversas cargas. La influencia del mallado se estudia utilizando un modelo numérico de una placa plana de pruebas, cambiando la densidad de su mallado para evaluar los efectos en los resultados.

Para realizar el estudio, se han desarrollado varios modelos de la placa con distintos niveles de refinado de la malla. La placa plana de pruebas esta simulada con el material UHMWPE. Los modelos han sido simulados bajo las mismas condiciones de carga, con la única diferencia siendo la densidad de la malla. Las condiciones iniciales de la simulación comprenden un proyectil a 350m/s de velocidad que impacta contra la placa.

Se han generado tres niveles de refinamiento de la malla para el estudio:

- Mallado grueso: el tamaño de sus elementos es de 0.025 m. Esta malla proporciona una vista general de la respuesta de la placa, pero en menor detalle. Este mallado tiene un total de 7344 elementos de tipo C3D8R.
- Mallado medio: el tamaño de sus elementos es de 0.0175 m. Esta malla tiene una densidad intermedia que ofrece un mayor detalle de la respuesta de la placa, pero tampoco conlleva un gran coste computacional. Este mallado tiene un total de 28413 elementos de tipo C3D8R.
- Mallado fino: el tamaño de sus elementos es de 0.01 m. Esta malla tiene un número elevado de elementos lo que permite capturar pequeños detalles de la respuesta de la placa. Tiene un coste computacional elevado. Este mallado tiene un total de 56738 elementos de tipo C3D8R.

Para realizar el estudio de este caso y sacar unas conclusiones concluyentes se han analizado diversos parámetros, y así aprender que opción es la más correcta. Los parámetros que se estudian son la rotura de capas, la fuerza recibida por la espuma y la deformación del modelo. En la Figura 6.1.1. se muestran los tres diferentes mallados.

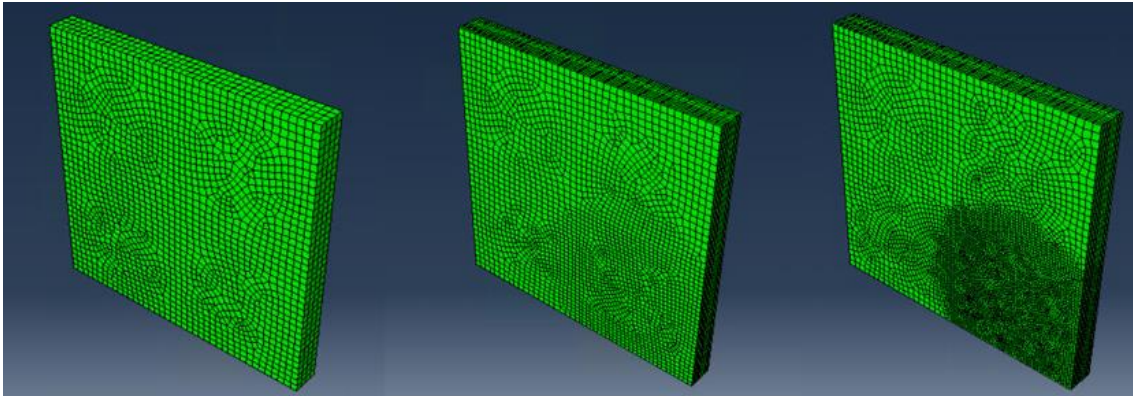


Figura 6.1.1. Tres niveles de mallado: grueso, medio y fino

### **Rotura de capas**

En los procesos de diseño y fabricación de equipos de protección, resulta fundamental contar con la capacidad de visualizar y analizar cómo los impactos afectan a estos equipos. Este análisis es crucial para asegurar que los dispositivos cumplan con el rendimiento esperado. Para ello, es necesario obtener resultados que reflejen fielmente el comportamiento real del material y la estructura bajo condiciones de impacto.

En primer lugar, tras realizar las simulaciones, se ha llevado a cabo una inspección visual detallada para evaluar el comportamiento del modelo mallado. Para cada refinamiento de la malla, se presentan una serie de Figuras que ilustran la deformación y ruptura sufridas por el modelo. En estas imágenes, se destaca, en primer lugar, la deformación del mallado en el instante en el que el proyectil impacta de pleno en la placa. En segundo lugar, para cada caso se muestra el estado final del mallado, capturando cómo se ve afectado después del rebote del proyectil.

Esta comparación visual entre diferentes niveles de mallado permite analizar cómo varían los resultados según el refinamiento, lo que lleva a comprender la precisión y similitud de la simulación a la realidad y poder replicar el comportamiento físico del material sometido al impacto.

1. Mallado grueso:

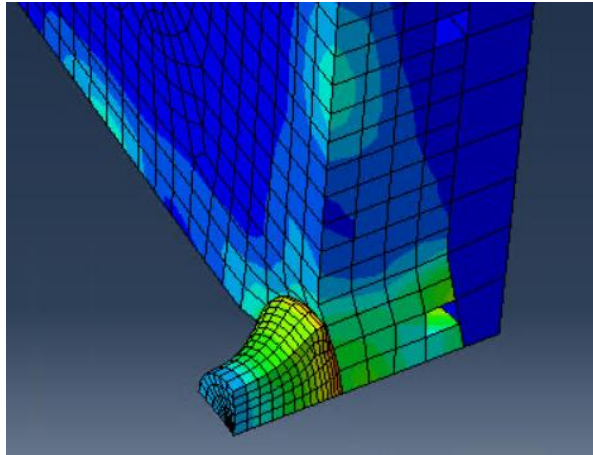


Figura 6.1.1.1. Instante inicial de impacto sobre placa en el mallado grueso

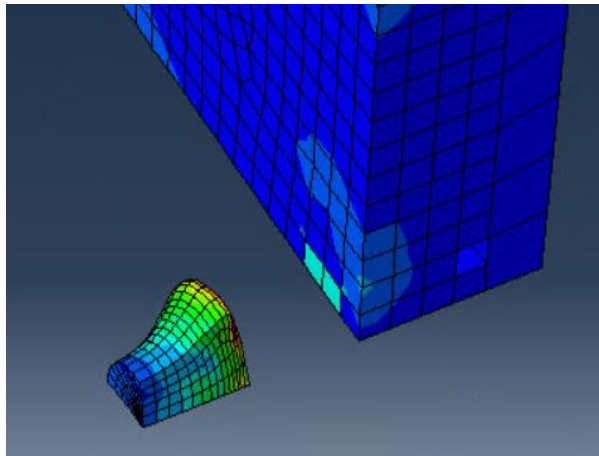


Figura 6.1.1.2. Resultado mallado grueso

2. Mallado medio:

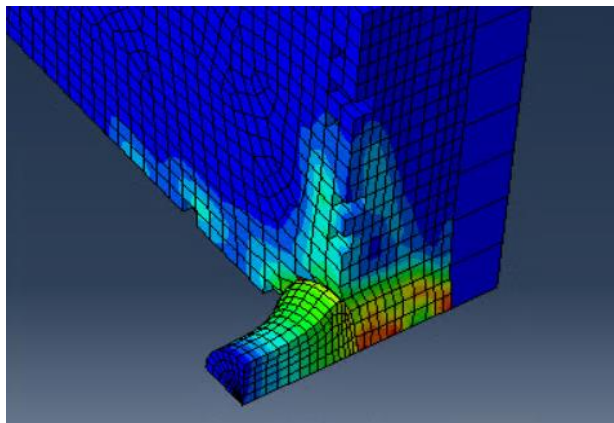


Figura 6.1.1.3. Instante inicial de impacto sobre placa en el mallado medio

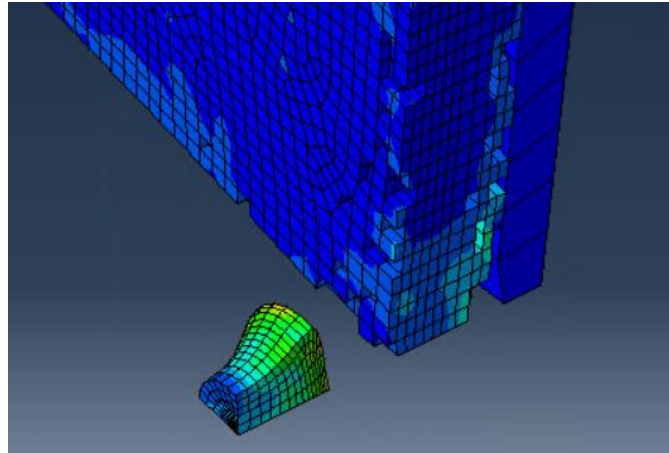


Figura 6.1.1.4. Resultado mallado medio

3. Mallado fino:

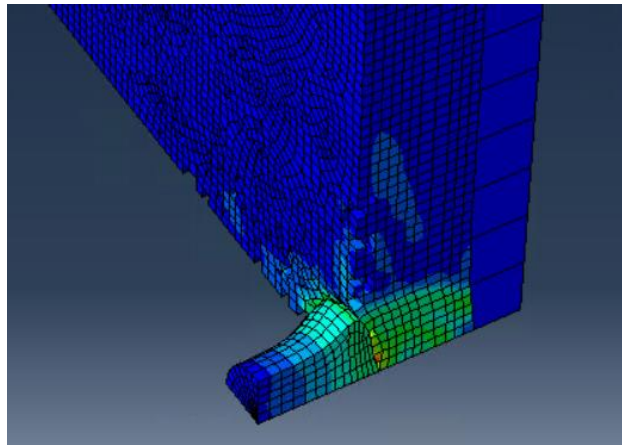


Figura 6.1.1.5. Instante inicial de impacto sobre placa en el mallado fino

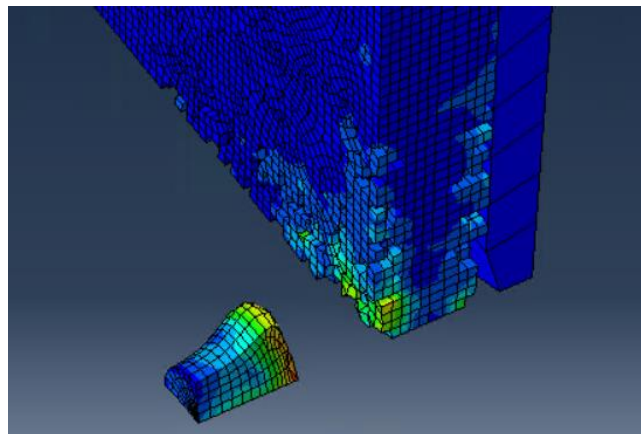


Figura 6.1.1.6. Resultado mallado fino

Tras realizar una inspección visual de los impactos en la placa utilizando diferentes niveles de refinamiento de malla, se pueden extraer conclusiones significativas. En primer lugar, se ha observado que a medida que aumenta la densidad de la malla y se aplica un mayor refinamiento, la solución obtenida muestra un comportamiento más realista, con un daño localizado más exacto en la zona de impacto. En las figuras anteriores (de la 6.1.1. a la 6.1.6.), los elementos que han sufrido rotura han sido eliminados por la subrutina de fallo, modelando la fractura de la placa. Como se ilustra en la figura 6.1.2., la placa presenta un daño mínimo, con una ruptura de los elementos casi imperceptible. Sin embargo, en los casos con mallas más refinadas, la simulación revela una rotura más pronunciada en la zona impactada, que refleja de manera más precisa lo que se esperaría de un impacto balístico en condiciones reales.

Conforme aumenta el refinamiento se puede observar la existencia de regiones en las que se han superado las condiciones críticas de fallo. Concretamente, los resultados muestran el fallo de las fibras.

Esta comparación pone en manifiesto la importancia crítica de la densidad de la malla. Un mallado insuficiente puede conducir a resultados inexactos, subestimando el daño real que podría sufrir el material, lo que puede llevar a un mal funcionamiento al fabricarse y que no podría garantizar los criterios de seguridad necesarios. Por lo tanto, es esencial seleccionar un nivel de refinamiento adecuado para garantizar que la simulación capture fielmente el comportamiento del material bajo condiciones de impacto, asegurando así la fiabilidad de los resultados.

Por otro lado, tener un alto refinamiento de la malla trae sus consecuencias. Cuanto mayor sea el refinamiento de la malla, el *software* de las simulaciones tendrá un coste computacional mayor para calcular los resultados, lo que implica una cantidad superior de tiempo para la realización de las simulaciones. Por ello, es necesario buscar un balance entre la precisión del mallado y el coste computacional.

### **Fuerza recibida por las espumas**

Tras realizar las simulaciones de impacto balístico con tres niveles diferentes de refinamiento de la malla, se busca evaluar la fuerza transmitida a la espuma en el modelo de la placa plana de pruebas. La espuma, ubicada tras las láminas, cumple un papel fundamental en la absorción de energía y en la dispersión de la fuerza transmitida, por lo que su análisis es esencial. En la Figura 6.1.1.7. se muestra una comparativa entre la fuerza recibida por la espuma en los tres niveles de refinamiento.

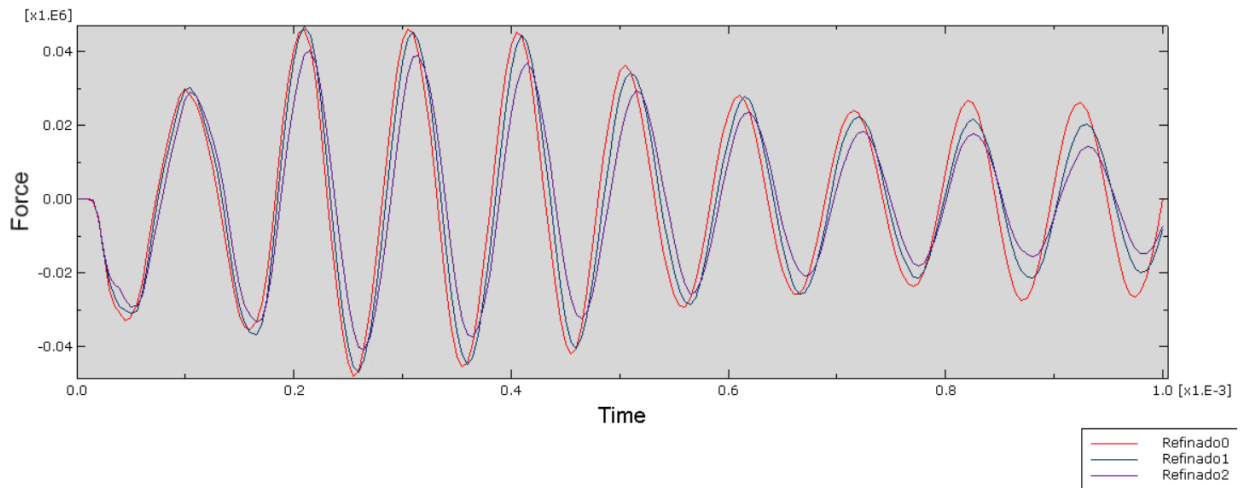


Figura 6.1.1.7. Fuerza recibida en diferentes refinados

Para cada nivel de refinamiento de la malla, se ha obtenido una distribución diferente de la fuerza recibida por la espuma. Como se observa en el gráfico, en el caso del mallado más grueso, la fuerza recibida registrada en la espuma ha sido mayor que en el resto de los refinamientos. En este refinado se puede visualizar que en primera instancia la espuma recibe una fuerza de entre  $4-5 * 10^4 N$  durante el primer ecuador de la simulación. Tras ello, la fuerza recibida disminuye considerablemente hasta unos valores de entre  $2-3 * 10^4 N$ , donde se estabiliza durante el resto de la simulación. Por tanto, se puede concluir que ha habido una atenuación aproximada de la fuerza desde el comienzo de la simulación de  $2 * 10^4 N$ .

Este hecho se puede atribuir a una representación menos precisa de la propagación del impacto y la deformación de la placa. Esto sugiere que el refinamiento es insuficiente y que como se muestra en la rotura de capas, al haber un menor número de elementos y no sufrir prácticamente daños, la fuerza transmitida a la espuma es mayor.

Para el segundo tipo de refinamiento, con una mayor precisión y menor tamaño de sus elementos, se puede apreciar que tiene unos valores similares de fuerza recibida al refinado más grueso en la primera parte de la simulación, entorno a los  $4-5 * 10^4 N$ . Sin embargo, en la segunda parte de la simulación se puede apreciar una disminución más considerable de la fuerza, orbitando en torno a los  $2 * 10^4 N$ .

Por el contrario, en el modelo con mayor refinamiento, la espuma ha experimentado fuerzas notablemente menores durante toda la simulación. En la primera parte de la simulación ha alcanzado los valores de fuerza de en torno a  $4 * 10^4 N$ , y tras estabilizarse en la parte final, la fuerza se encuentra por debajo de los  $2 * 10^4 N$ .



Por lo tanto, la fuerza recibida por la espuma con un refinado más fino es considerablemente menor. Este comportamiento indica que un mallado con una mayor densidad captura mejor el proceso de absorción de energía. La diferencia en los resultados expone la importancia del mallado y comprobar que un mayor refinamiento lleva a unos resultados más precisos.

En resumen, los resultados obtenidos de la fuerza recibida por la espuma en diferentes densidades de la malla exponen que se puede llegar a una subestimación de la energía absorbida si el modelo no tiene un refinamiento apropiado, lo que es crucial para el diseño de equipos de protección balística. Por último, cabe mencionar que no se ha seguido refinando la malla en mayor medida ya que el coste computacional es bastante más elevado.

### **Deformación de la placa**

Otro factor importante para evaluar en los impactos balísticos es la deformación que experimentan los equipos de protección, ya que una deformación excesiva puede generar lesiones moderadas en la cabeza. Por este motivo, se analiza si existen diferencias en los resultados de la deformación sufrida por la placa en función de los diferentes refinamientos aplicados.

Para determinar la deformación de la placa, se ha calculado el desplazamiento máximo que presenta el modelo numérico de la placa plana en la dirección Z, que es la dirección en la que se produce el impacto del proyectil.

Para el cálculo del desplazamiento, se ha registrado el desplazamiento que sufre uno de los nodos de la espuma, situada detrás de la placa y unida a ella mediante una restricción de tipo TIE. La ubicación del nodo se encuentra directamente en la línea de acción del proyectil, en la esquina inferior derecha de la placa. Se ha seleccionado este nodo ya que, al estar en la línea del proyectil, experimentará el mayor desplazamiento debido a la fuerza de impacto.

A continuación, en la Figura 6.1.1.8. se muestra el desplazamiento, en metros, del nodo a lo largo del ensayo para los distintos refinados.

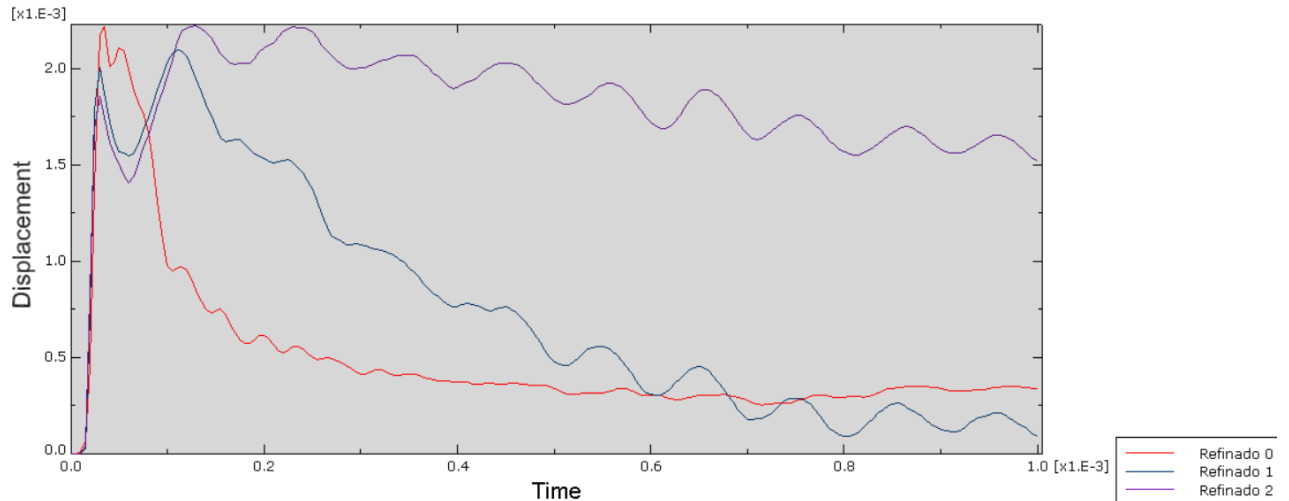


Figura 6.1.1.8. Desplazamiento de la malla para los diferentes refinados

Como se puede observar en el gráfico, existen diferencias significativas entre los distintos grados de refinamiento de la malla. En primer lugar, para la malla con el refinamiento más grueso, el desplazamiento es mayor en el momento del impacto, pero luego disminuye notablemente. Este comportamiento podría explicarse por la ausencia de perforación del proyectil en la placa, lo que sugiere que la placa no ha experimentado una deformación tan severa. En ese caso, se produce una atenuación excesiva del impacto del modelo, comportándose de una forma más elástica.

Por otro lado, los refinamientos medio y fino muestran una función de desplazamiento similar entre sí, aunque con valores distintos. Esta similitud se distingue claramente del comportamiento observado en el refinamiento grueso, debido a que en estos casos sí que ha existido perforación del proyectil en la placa. Este hecho demuestra que, si la malla no se refina con una precisión adecuada, se subestima la magnitud de las cargas que actúan en las simulaciones y muestra unos resultados que se alejan de la realidad.

Al analizar los refinados más precisos, se distingue que el refinamiento fino experimenta un mayor desplazamiento, indicando que el impacto ha sido más perjudicial en este caso, resultando en una deformación más significativa en los otros escenarios.

En conclusión, tras realizar un estudio de cómo afecta el refinamiento en las simulaciones, los resultados sugieren que un refinamiento insuficiente de la malla puede llevar a una subestimación de los efectos del impacto, mientras que un refinamiento más detallado permite analizar en mayor precisión la magnitud de los daños sufridos por el modelo numérico de la placa plana. Esto indica la importancia de la malla del modelo para evaluar correctamente el comportamiento de un material bajo una carga de impacto.

### 6.1.2. Configuración del laminado

Al trabajar con materiales compuestos ortótropos, que poseen propiedades distintas según la dirección, es crucial establecer las orientaciones de las capas para optimizar las características mecánicas del material. Al combinar capas con diversas orientaciones, se puede mejorar la resistencia del laminado frente a tracción, compresión y cortadura, aspectos clave en impactos balísticos. Si todas las capas están orientadas en la misma dirección, el compuesto sería resistente solo en esa dirección, pero débil en el resto.

Este hecho demuestra la importancia de utilizar configuraciones con orientaciones variadas para maximizar el rendimiento del material. Por esta razón, se lleva a cabo un estudio del comportamiento de diferentes configuraciones de un mismo material ante un impacto balístico.

Para llevar a cabo este estudio se han escogido 6 configuraciones diferentes que se muestran a continuación. Cabe destacar que la orientación de las láminas sigue el sistema de referencia que se muestra en la Figura 6.1.2.1. y la nomenclatura sigue el modelo tradicional.

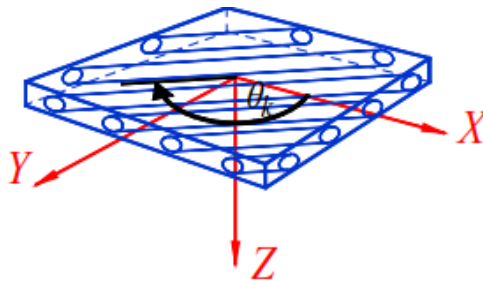


Figura 6.1.2.1. Sistema de referencia [ T5 diseño]

Las configuraciones que se han sometido a el análisis son:

1. Laminado [0/0/0/0].
2. Laminado [0/45/90/-45].
3. Laminado simétrico [30/0/0/30].
4. Laminado cruzado [45/-45/45/-45].
5. Laminado [15/-15/45/-45].
6. Laminado [15/30/45/60].

Para llevar a cabo el estudio, se someten a simulación las distintas configuraciones sobre el modelo numérico de la placa plana de pruebas. Este modelo es evaluado bajo un impacto balístico, donde se aplica el material compuesto UHMWPE sobre la placa, utilizando un proyectil con una velocidad nominal de 350 m/s.

Otro aspecto a destacar es que, para este estudio, no se ha aplicado la subrutina de daño, para poder analizar correctamente la energía que se almacena en la placa.

El objetivo de este estudio es identificar qué configuraciones propuestas ofrecen un mayor rendimiento frente al impacto. Para ello, se analizan varios parámetros clave, incluyendo la fuerza recibida por la espuma ubicada detrás de la placa, la energía interna total (ALLIE) acumulada en el material durante la deformación. Estos análisis permitirán determinar que configuración ofrece una mayor resistencia a impacto.

Tras las simulaciones, se han obtenido los resultados de los distintos parámetros para cada configuración. En la Tabla 6.1.2.1. se exponen los resultados de las energías máximas obtenidas durante el ensayo.

<b>Configuraciones</b>	<b>ALLIE máx. (J)</b>
Laminado [0/0/0/0]	34.30
Laminado [0/45/90/-45]	34.27
Laminado [30/0/0/30]	34.46
Laminado [45/-45/45/-45]	34.39
Laminado [15/-15/45/-45]	34.58
Laminado [15/30/45/60]	34.67

Tabla 6.1.2.1. ALLIE de las diferentes configuraciones

En primer lugar, en un impacto balístico, es preferible que los valores de ALLIE sean altos, ya que esto refleja una mayor absorción de energía por parte del material, lo que se traduce en una mejor capacidad de protección del sistema.

Al analizar los valores de las configuraciones en la tabla anterior, se puede determinar cuáles laminados son los más adecuados y cuáles no. Por ejemplo, el laminado 2 podría descartarse debido a que sus valores de energía son inferiores en comparación al resto.

Antes de determinar que configuraciones son las óptimas para maximizar el impacto balístico, es necesario realizar un análisis de la fuerza que recibe la espuma. En este contexto, se expone la función de la fuerza correspondiente a los seis laminados evaluados, como se muestra en los siguientes gráficos. Es importante resaltar que, en los gráficos, las unidades de medida para la fuerza están expresadas en newtons y el tiempo en segundos.

# Diseño de un casco de combate fabricado con materiales compuestos

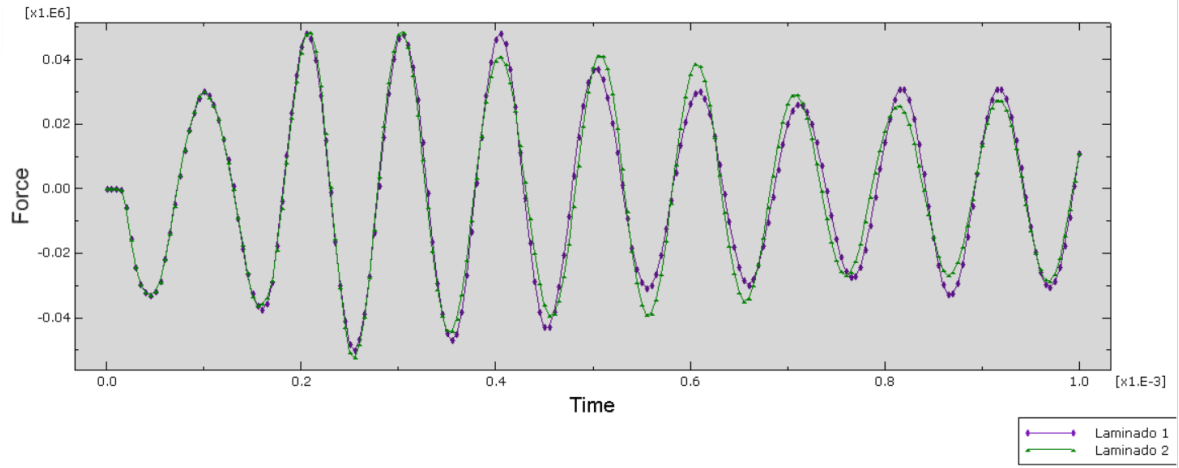


Figura 6.1.2.2. Fuerza laminados 1 y 2

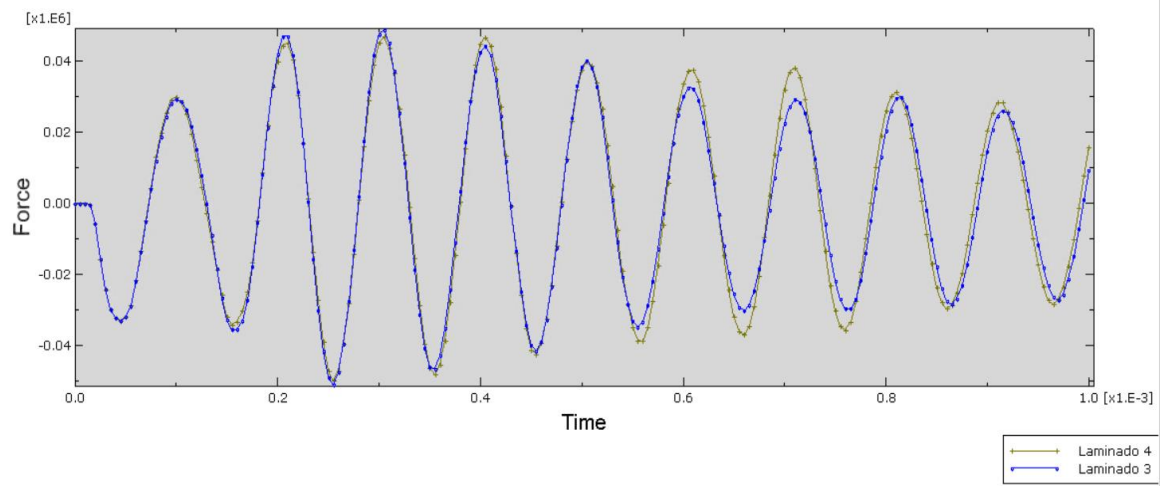


Figura 6.1.2.3. Fuerza laminados 3 y 4

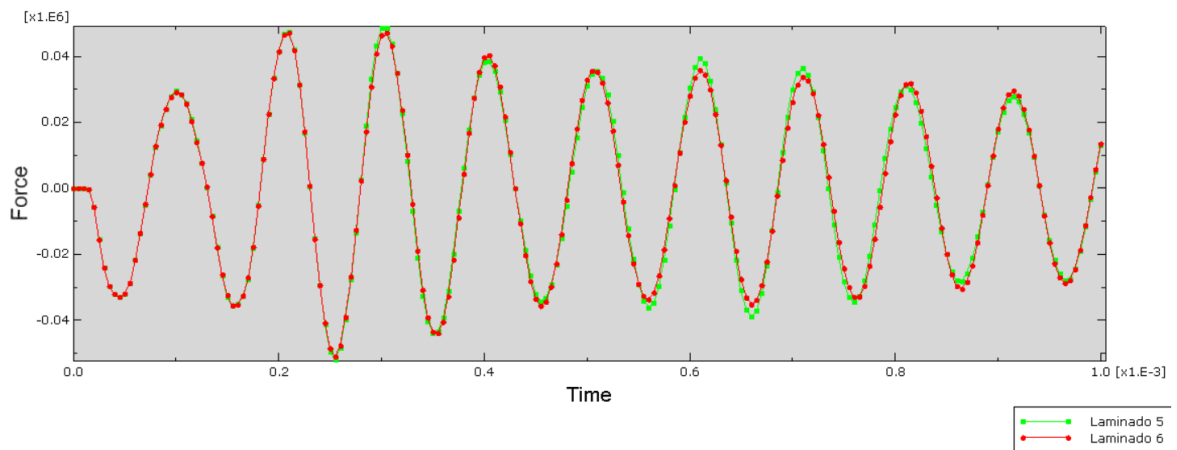


Figura 6.1.2.3. Fuerza laminados 5 y 6

Después de analizar las funciones de fuerza recibida por la espuma y los valores obtenidos de las energías, se pueden identificar que laminados son los óptimos y cuáles deben de ser descartados.

En primer lugar, se puede observar que, en la primera mitad del tiempo, la mayoría de los laminados sufren una fuerza de entorno los  $5 \times 10^4 \text{N}$ . No obstante, se puede apreciar que los laminados 5 y 6 disminuyen sus valores de fuerza y se estabilizan en torno a los 0.4 ms, por lo que la fuerza que reciben es menor.

En segundo lugar, los laminados 2 y 4 deben de ser desechados debido a que, cómo se observa en los gráficos, tardan más tiempo en reducir la fuerza recibida y estabilizarse en el intervalo de fuerza mínima que recibe el sistema. Este descarte se confirma también con los valores de energía que reflejan en la Tabla 6.1.2.1., inferiores a otros laminados como el 5 y el 6.

Por otro lado, los laminados 1 y 3 reciben una fuerza similar que los laminados 5 y 6 durante la parte inicial y final. Sin embargo, se seleccionan los laminados 5 y 6 ya que a partir de ellos se han obtenido unos valores de energía óptimos, lo que les proporciona una mejor distribución de las cargas durante el impacto.

Como conclusión de este análisis, se puede afirmar que, aunque se han identificado dos laminados mejores que el resto, las diferencias entre los laminados no son muy notables. Aunque en relación con la fuerza recibida por la espuma se han notado ciertas diferencias entre los laminados, con respecto a la energía interna total y la cinética, los valores son muy similares y no existen por tanto diferencias notables para poder seleccionar las mejores opciones.

## 6.2. Estudio 2: estudio paramétrico de la v50

En la actualidad, el constante avance tecnológico y la innovación en materiales compuestos han hecho necesario realizar un análisis exhaustivo para identificar los materiales más adecuados para sistemas de protección balística. La elección de estos materiales es crítica, ya que deben de garantizar la integridad y seguridad del equipo de protección, minimizando el riesgo de lesiones en el usuario.

Una vez determinados los parámetros óptimos para realizar las simulaciones en la placa plana de pruebas, se procede a evaluar el comportamiento de tres materiales compuestos bajo un impacto balístico. Estos materiales, descritos en el capítulo del modelo numérico de la placa plana, son sometidos a un estudio paramétrico con el fin de determinar la velocidad del proyectil a la cuál estos materiales tienen un 50 % de posibilidades de fallar, lo que les impediría cumplir con su función de protección.

Para cada material, se realizan simulaciones de impacto balístico a alta velocidad. El proceso comienza con una velocidad estándar de 350 m/s como marca la norma para impactos balísticos de alta velocidad, y si el material soporta el impacto, la velocidad del proyectil se incrementa en 25 m/s sucesivamente hasta que la placa sufra un daño crítico que comprometa la seguridad del equipo. En el caso en que el material no soporte la velocidad de la norma o una mayor, se procederá a realizar el estudio con unas velocidades inferiores para analizar hasta que velocidad es seguro su uso y cuanta energía almacena por cada velocidad. Es importante destacar que cada material se ha simulado utilizando las dos configuraciones de laminado más favorables identificadas en el estudio anterior, para observar cómo varía la respuesta del material en función de la configuración seleccionada.

A continuación, se muestra en el Figura 6.2.1. la energía interna total de todos los materiales para el primer laminado con orientaciones [15/-15/45/-45]. Por otra parte, en el Figura 6.2.2. se muestran para el segundo laminado con orientaciones [15/30/45/60].

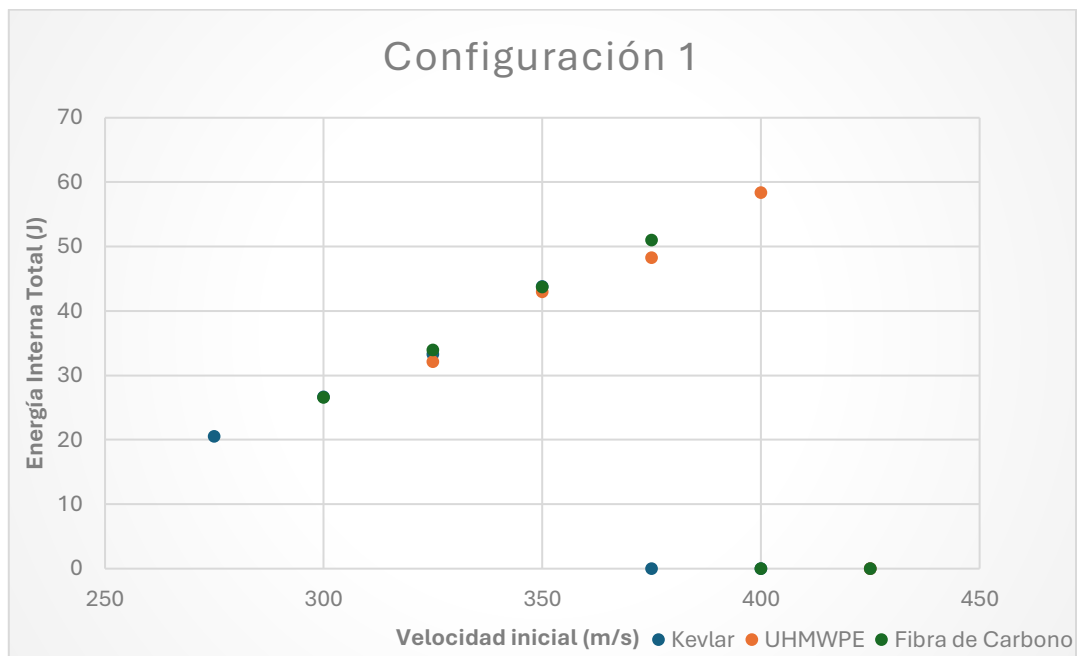


Figura 6.2.1. Resultados configuración [15/-15/45/-45]

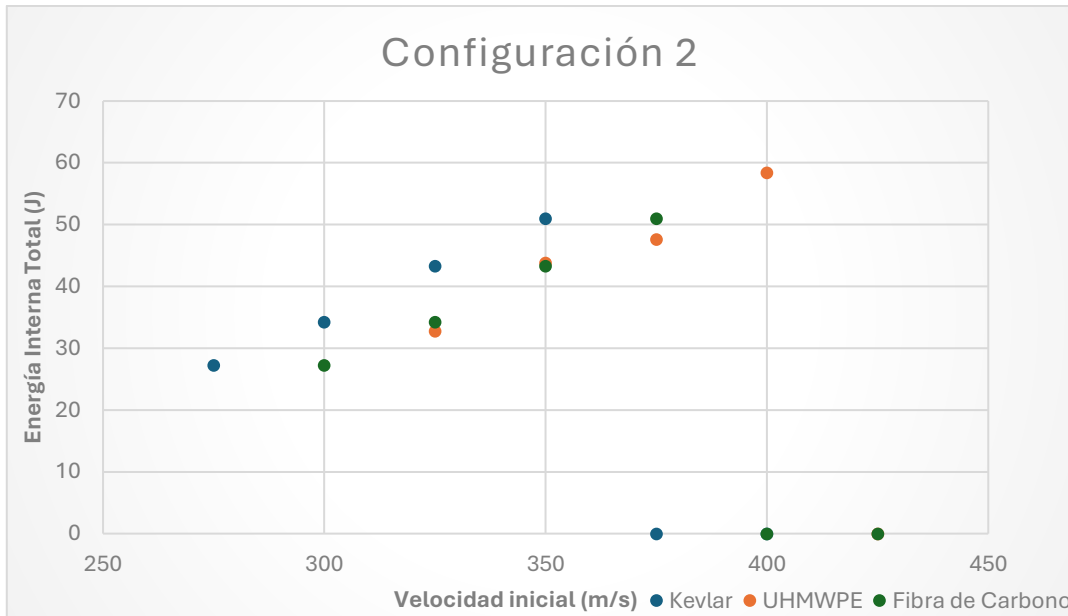


Figura 6.2.2. Resultados configuración [15/30/45/60]

En primer lugar, el material UHMWPE tiene la capacidad de soportar velocidades iniciales del proyectil de hasta 400 m/s. Sin embargo, cuando se supera esta velocidad, el material experimenta un fallo crítico que compromete gravemente su capacidad de protección, lo que indica que pierde su función principal. Como se aprecia en el Gráfico 6.2.1. el material ha soportado una velocidad

Además, el gráfico revela que los valores de la energía interna total obtenidos son similares entre los dos laminados evaluados. El primer laminado este compuesto por capas con orientaciones de 15/-15/45/-45, mientras que el segundo laminado presenta una disposición de sus láminas en ángulos de 15/30/45/60. Este detalle sugiere que, a pesar de las diferencias en la orientación de las láminas, ambos laminados exhiben un comportamiento similar en términos de energía interna total, lo que podría ser relevante para el análisis de su rendimiento.

En segundo lugar, se procede al análisis del segundo material compuesto. Este material es un Kevlar 29, una de las primeras variantes del material ampliamente utilizada en diversas industrias. Como se puede apreciar en el gráfico, el material Kevlar soporta una velocidad inicial del proyectil de hasta 350 m/s, cumpliendo la normativa al límite. Tras esta velocidad, el material sufre un fallo crítico que le impide cumplir su función.

Al comparar la respuesta de los dos laminados, se puede visualizar que la energía interna total de la placa para los dos laminados tiene similitudes. En velocidades más bajas, el laminado 2 absorbe una mayor cantidad de energía, demostrando así el estudio realizado sobre las configuraciones de los laminados.



Por último, falta por analizar el tercer material compuesto elegido para este estudio. Este material es la fibra de carbono, que destaca por su alta maleabilidad lo que permite desarrollar geometrías más complejas. Como se puede visualizar, la fibra de carbono soporta una velocidad nominal del proyectil de hasta 375 m/s, cumpliendo la normativa. Tras esta velocidad nominal, el material sufre un fallo crítico lo que provoca que deje de cumplir su funcionalidad y falle como sistema de protección.

Tras el análisis por separado de los tres materiales, falta por determinar qué 2 materiales son los óptimos para el estudio final en el casco de combate. Como se puede apreciar, los tres materiales tienen valores similares en la cantidad de energía interna total que obtienen a la misma velocidad. Por ello, la principal razón de la elección de los materiales es a qué velocidad aguantan antes del fallo. Por tanto, los materiales seleccionados son el UHMWPE y la Fibra de Carbono. Estos materiales tienen destacadas propiedades mecánicas y presentan un superior desempeño frente a impactos balísticos frente al material descartado.

Después de llevar a cabo este estudio, es importante aclarar ciertos aspectos relacionados con el cálculo de la  $v_{50}$ . La  $v_{50}$ , que se refiere a la velocidad a la cual existe un 50% de probabilidad de que un proyectil penetre o no una protección, requiere un análisis exhaustivo. A partir de las simulaciones realizadas, se puede concluir que la  $v_{50}$  se sitúa entre la primera velocidad a la que se detecta el fallo en los diferentes materiales y la velocidad anterior, en la que el material todavía logra resistir el impacto.

Por lo tanto, en lugar de asignar un valor único, es más preciso considerar que la  $v_{50}$  está comprendida entre estos dos límites. Para obtener un valor más exacto de la  $v_{50}$ , sería recomendable realizar simulaciones intermedias entre los dos puntos, lo que permitiría reducir la incertidumbre, pero se considerará para un trabajo futuro.

### 6.3. Estudio 3: Impacto sobre el casco

Finalmente, después de completar los estudios sobre la placa plana de pruebas y determinar las opciones más favorables para resistir impactos balísticos a alta velocidad, es necesario extender este análisis a una geometría más compleja para comprender mejor el comportamiento del equipo en condiciones más realistas.

En este caso, se examina en detalle el comportamiento de un casco de combate simplificado cuando se somete a un impacto balístico. Mediante las simulaciones, se evalúa la respuesta del casco en diversos escenarios de impacto, considerando el uso de dos materiales compuestos distintos, los materiales con mejor respuesta del caso anterior. Este estudio tiene como objetivo no solo validar la efectividad del diseño del modelo numérico, sino también identificar posibles mejoras para aumentar la protección del equipo en un trabajo futuro.

Para llevar a cabo las simulaciones, se han seleccionado un punto estratégico de impacto en el casco, en la parte lateral. Este punto ha sido elegido siguiendo la normativa y porque es un escenario de impacto común y crítico que el casco de combate podría enfrentar en situaciones reales. En las simulaciones, el proyectil, con una velocidad nominal de 350 m/s, impacta directamente contra el casco, siguiendo las indicaciones de la normativa con respecto a la localización del impacto.

El primer material utilizado en las simulaciones es el UHMWPE, estudiado en los casos anteriores. En las siguientes figuras se puede visualizar diferentes momentos de la simulación donde está impactando el proyectil contra el casco de combate.

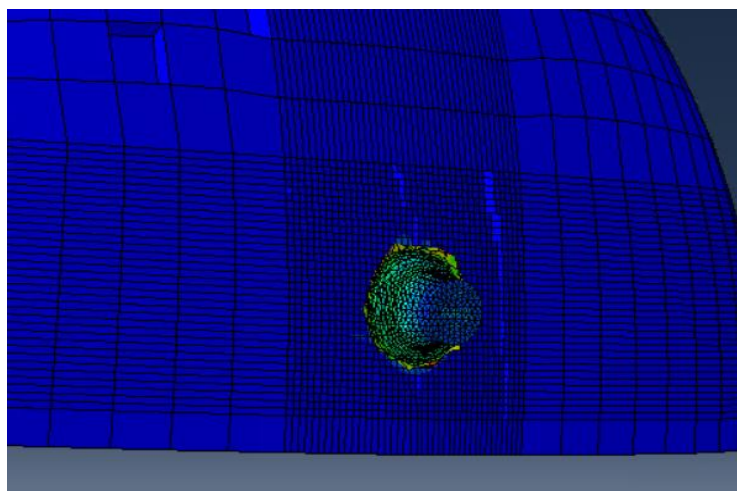


Figura 6.3.1. Momento de impacto en material UHMWPE

Diseño de un casco de combate fabricado con materiales compuestos

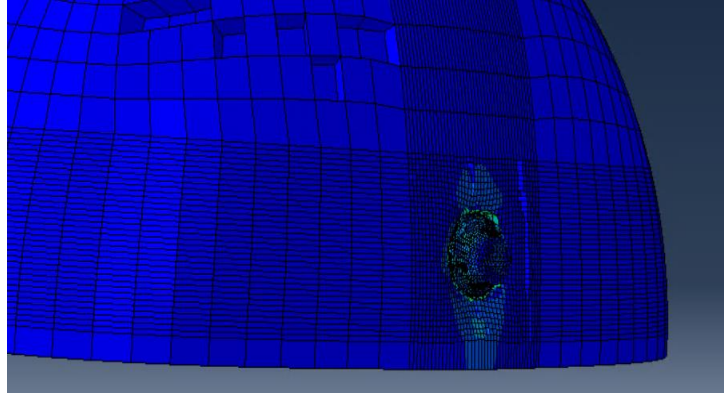


Figura 6.3.2. Momento de impacto 2 en material UHMWPE

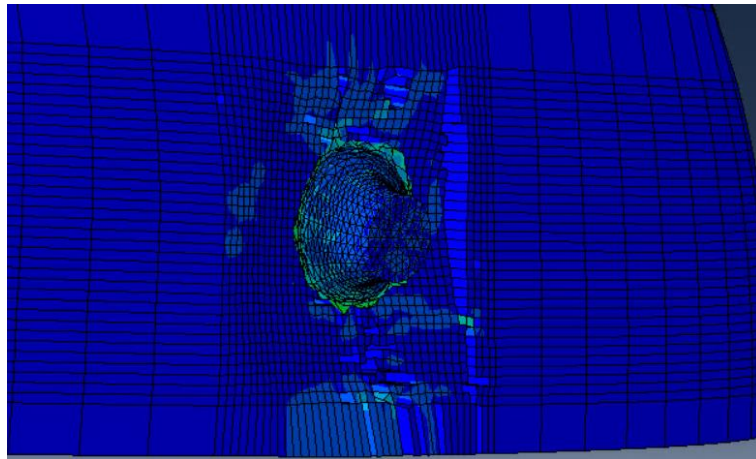


Figura 6.3.3. Momento de impacto 3 en material UHMWPE

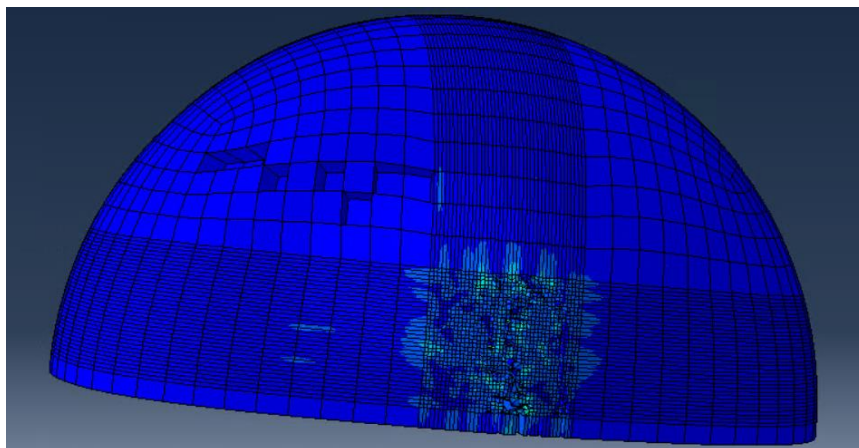


Figura 6.3.4. Resultado del impacto en UHMWPE

Cabe mencionar que la variable que se muestra en pantalla es la energía de von Mises, la cual llega a unos valores de  $10^9$  Pa.

Tras llevar a cabo las simulaciones, se puede observar que el casco de combate demuestra una notable capacidad para resistir el impacto balístico de manera efectiva. A pesar de que el casco ha logrado repeler el impacto del proyectil, es importante señalar que se ha producido una rotura en su estructura. Sin embargo, el nivel de daño sufrido no es considerablemente alto, lo que indica que el casco ha cumplido su función aún podría continuar en funcionamiento, pero al ser dañado, este equipo de protección pierde su capacidad protectora y se debería de sustituir.

Además, se ha llevado a cabo un análisis detallado de la energía interna total acumulada por la calota a lo largo de la simulación. Este estudio ha permitido identificar que la calota ha alcanzado unos valores máximos de en torno a 132 J en cuanto a la energía absorbida. Este valor refleja la capacidad del material para almacenar energía bajo las condiciones de carga.

Después de analizar el primer material a estudio, se procede al análisis del segundo material escogido, la fibra de carbono. Tras las simulaciones realizadas en él, en las siguientes figuras se puede visualizar el impacto balístico en determinados momentos de la simulación, y su resultado final.

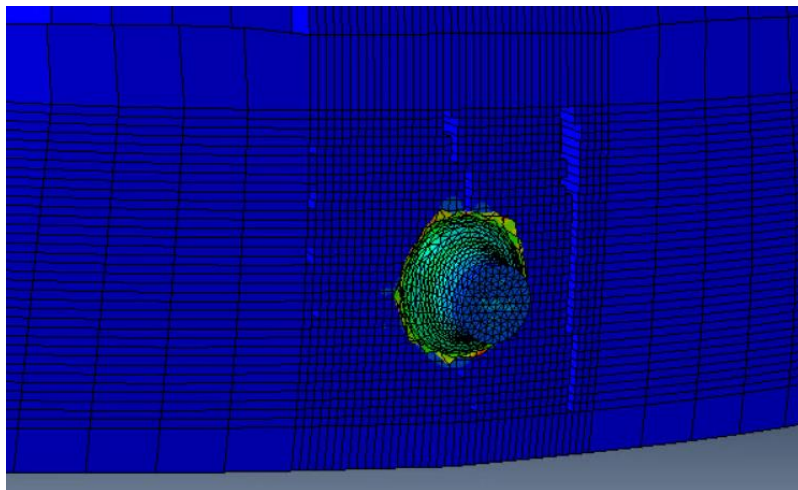


Figura 6.3.5. Momento de impacto en material fibra de carbono

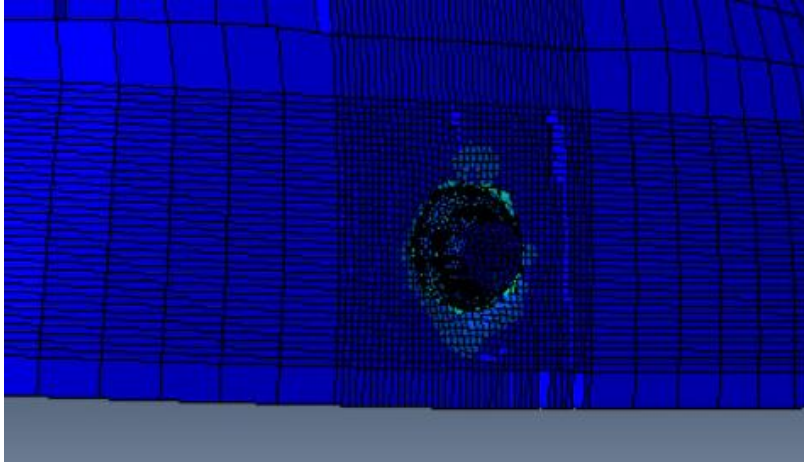


Figura 6.3.6. Momento de impacto 2 en material fibra de carbono

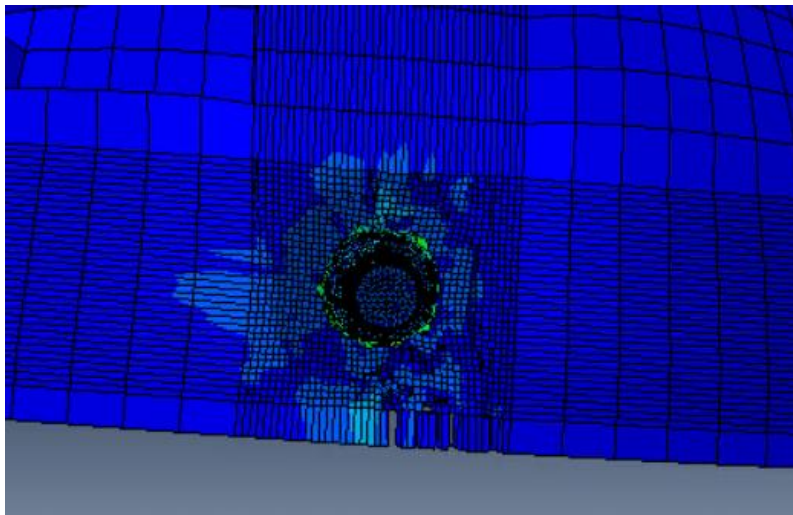


Figura 6.3.7. Momento de impacto 3 en material fibra de carbono

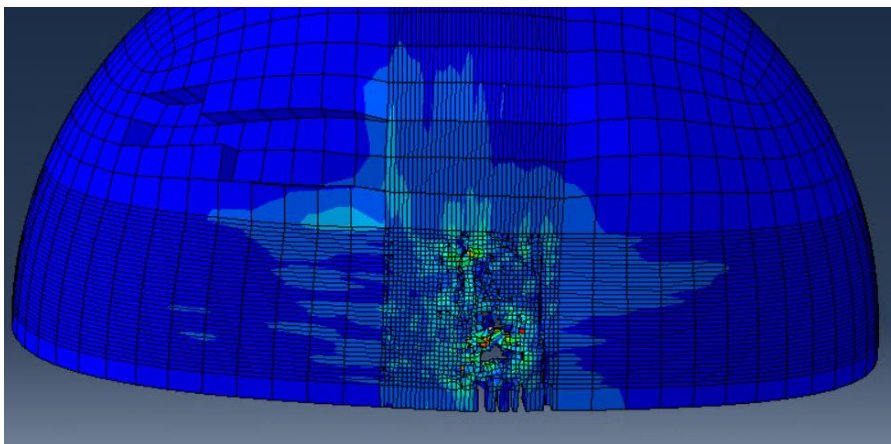


Figura 6.3.4. Resultado impacto en fibra de carbono

Tal como se observa en los resultados de la simulación del impacto balístico, el casco de combate ha demostrado ser capaz de resistir el impacto. No obstante, a pesar de cumplir con su función principal de protección, es evidente que el casco ha sufrido un daño significativo. En ciertas áreas, el impacto ha sido lo suficientemente severo como para eliminar completamente los elementos que forman la capa del casco. Además, en las simulaciones se ha obtenido una energía de von Mises de entorno a  $10^9$  Pa.

Este nivel de deterioro es considerable, ya que compromete la integridad del casco y su capacidad para ofrecer protección en situaciones de combate prolongadas. Para abordar este problema, sería recomendable incorporar un sistema de amortiguación en el diseño del casco para que absorba en mayor medida el impacto.

Otra alternativa que podría considerarse es incrementar el número de láminas para mejorar el nivel de protección. Sin embargo, este enfoque conllevaría un aumento en el peso del conjunto, lo que requeriría un análisis adicional para evaluar cómo este incremento afectaría al rendimiento general y funcionalidad del diseño.

Por último, se ha analizado la energía interna total que absorbe la calota a lo largo de la simulación. Se ha permitido identificar que la calota ha alcanzado un valor máximo entorno a los 138 J en cuanto a energía absorbida.

Para futuros trabajos, se identifican varias áreas en las que se podrían realizarse mejoras significativas. En primer lugar, en el presente estudio, el diseño del casco de combate se ha abordado como un único tejido uniforme, aunque está formado por 4 láminas con la misma orientación. No obstante, sería posible desarrollar el casco de combate utilizando varias configuraciones, tal como se ha hecho en los otros casos para el modelo numérico de la placa plana de pruebas. Este enfoque podría permitir una optimización del rendimiento del casco, aprovechando las ventajas de las diferentes orientaciones y capas de material para mejorar su capacidad de protección.

En segundo lugar, con el objetivo de realizar una simulación más precisa y realista, sería beneficioso implementar un sistema de amortiguación interna en el casco, como se ha mencionado antes. Este sistema que desempeña un importante papel en la absorción de impactos podría permitir una evaluación más detallada de la fuerza transmitida al usuario. Al incluir este sistema en las simulaciones, se podría analizar con mayor precisión si el usuario corre el riesgo de sufrir lesiones en la cabeza bajo las condiciones de impacto.

## 7. Conclusiones y limitaciones

En el presente Trabajo Final de Grado se ha realizado el diseño de una calota de combate con materiales compuestos contra dos objetivos, una placa plana y casco de combate, de forma numérica. Además, se han desarrollado estudios para analizar diversos parámetros como la elección del material, la influencia del mallado, etc. Finalmente se ha analizado la respuesta de un impacto balístico en una calota, permitiendo comprobar si cumple su funcionalidad.

### 7.1. Conclusiones

En relación con los objetivos marcados durante este trabajo final de grado, se puede concluir que:

- Se ha conseguido desarrollar una metodología numérica empleando el código comercial de elementos finitos Abaqus/Explicit, modelizando dos tipos de escenarios diferentes. En los dos escenarios se ha considerado un fallo en tres dimensiones a través de la implementación de una subrutina de daño.
- Se han seleccionado los materiales compuestos más adecuados para el diseño final del producto mediante la realización de un estudio paramétrico para calcular la velocidad nominal del proyectil al cuál el material falla entre los materiales compuestos elegidos en primera instancia.
- Se ha llevado a cabo un proceso de aprendizaje, en el cual se ha aprendido como influyen diversos parámetros dentro de las simulaciones de impactos balísticos, para finalmente seleccionar las mejores opciones para llevar a cabo unas simulaciones que se asemejen en mayor cantidad a la realidad.

En cuanto a los parámetros considerados de importancia para el análisis de impactos se puede concluir que:

- Tras el estudio de las diferentes orientaciones de los laminados, las mejores han sido la configuración 15/-15/45/-45 y 15/30/45/60. Cabe destacar que la última configuración, a pesar de no ser una de las comúnmente utilizadas, ha ofrecido una mejor respuesta frente a otras configuraciones más utilizadas en el campo.

- La selección del material desempeña un papel crucial en el comportamiento ante impactos balísticos, siendo uno de los factores más determinantes en el desempeño del sistema de protección. A través de los estudios realizados, se ha podido concluir que la elección del material tiene una influencia significativamente mayor que las configuraciones del laminado, como se puede apreciar en el estudio 1 y 2.
- En el estudio 3, se ha observado que el modelo numérico presenta un daño significativo para uno de los casos, lo que representa un obstáculo para realizar ensayos experimentales. Como solución a este problema, se ha pensado para un trabajo futuro en incrementar el número de capas en el casco de combate, lo que aumentaría su grosor y mejoraría su resistencia a los impactos.
- La discretización de los elementos cobra una gran importancia, pudiendo influir en la respuesta final. Esto es debido a la subestimación de las cargas que provoca unos resultados dispares de la realidad. Por ello, es necesario que el mallado tenga una densidad lo suficientemente alta para que se asimile más a la realidad.

## 7.2. Limitaciones del proyecto

En la realización del proyecto han surgido varias limitaciones e inconvenientes que se podrían solventar en un futuro trabajo.

En primer lugar, inicialmente para el proyecto se había pensado en realizar ensayos experimentales en la Universidad, para verificar los resultados de las simulaciones realizadas. El problema es que los equipos de calibración de los ensayos no se han podido utilizar por agentes externos que no podíamos solucionar dentro de la universidad.

En segundo lugar, debido a la falta de tiempo y experiencia del estudiante, hay ciertos aspectos de las simulaciones que se podrían mejorar. Por ejemplo, en el caso de definir el fallo de los materiales, al no existir modelo de daño en tres dimensiones para nuestro caso, no se ha modelizado la delaminación de los materiales, lo que podría influir en el fallo. Otro aspecto relacionado con el modelo de fallo es que se podría haber considerado también un modelo de fallo progresivo, lo que arrojaría unos resultados más próximos a la realidad.

Por otra parte, se podría haber realizado una discretización mayor de la malla, pero tendría un coste computacional demasiado elevado. Contando con la cantidad de simulaciones que se han realizado, esta discretización hubiese derivado en un excesivo tiempo para poder las simulaciones.



Por último, a falta también de un mayor tiempo, en el modelo numérico del casco de combate se ha simulado como un tejido único y no como un conjunto de láminas, por lo que los resultados de estas simulaciones puede que no se asemejen tanto a la realidad.

## 8. Bibliografía

- [1] Arruda, M. R. T., Almeida-Fernandes, L., Castro, L., & Correia, J. R. (2021). Orthotropic damage model using Tsai-Wu failure criteria. In Proceedings of the American Society for Composites 36th Technical Conference. College Station.
- [2] Asyraf, M. Z., Suriani, M. J., Ruzaidi, C. M., Khalina, A., Ilyas, R. A., Asyraf, M. R. M., Syamsir, A., & Azmi, A. (2022). Development of natural fibre-reinforced polymer composites ballistic helmet using concurrent engineering approach. *Sustainability*, 14.
- [3] Chen, X., Sun, X., Chen, P., Wang, B., Gu, J., Wang, W., Chai, Y., & Zhao, Y. (2021). Rationalized improvement of Tsai–Wu failure criterion considering different failure modes of composite materials. *Composite Structures*, 256, 113120.
- [4] Chhetri, S., & Bougherara, H. (2021). A comprehensive review on surface modification of UHMWPE fiber and interfacial properties. *Composites: Part A*, 140.
- [5] Dassault Systèmes. (2012). Abaqus 6.12 User's Manual.
- [6] DuPont. (2017). KEVLAR® aramid fiber technical guide. DuPont.
- [7] Farahnak, A., & Fakoor, M. (2024). Extension of Tsai-Hill failure concept for mixed-mode I/II fracture investigation of orthotropic materials considering T-stress effects. *International Journal of Solids and Structures*, 302, 112991.
- [8] Fawaz, R., Schmitt, M., Robert, P., Beucler, N., Delmas, J.-M., Dessea, N., Sellier, A., & Dagaind, A. (2023). Neurosurgical management of penetrating brain injury during World War I: A historical cohort. *Neurochirurgie*, 69.
- [9] Fuenmayor Fernández, F. J., Ródenas García, J. J., & Nadal Soriano, E. (2023). Técnicas computacionales en ingeniería mecánica [Documento de clase]. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.
- [10] Gu, J., Chen, P., Su, L., & Li, K. (2021). A theoretical and experimental assessment of 3D macroscopic failure criteria for predicting pure inter-fiber fracture of transversely isotropic UD composites. *Composite Structures*, 259, 113466.

- [11] Lin, J., Li, Y., Liu, S., & Fan, H. (2023). Numerical investigation of the high-velocity impact performance of body armor panels. *Thin-Walled Structures*, 189.
- [12] Lin, S., Yang, L., Xu, H., Jia, X., Yang, X., & Zu, L. (2021). Progressive damage analysis for multiscale modelling of composite pressure vessels based on Puck failure criterion. *Composite Structures*, 255, 113046.
- [13] Mata Díaz, A. (2017). Análisis del comportamiento de fragmentos de carbono/epoxi en régimen de impacto (Tesis de grado). Universidad Carlos III de Madrid.
- [14] Military Agency for Standardization (MAS). (1982). Standardization agreement (SATANAG 4090). North Atlantic Treaty Organization.
- [15] Musib, M. K. (2011). A review of the history and role of UHMWPE as a component in total joint replacements. *International Journal of Biological Engineering*, 1(1), 6-10.
- [16] Palomar Toledano, M. (2017). Modelado mediante elementos finitos del impacto en elementos de protección personal fabricados con materiales compuestos (Trabajo final de máster). Universidad Politécnica de Valencia.
- [17] Qiang, L.-S., Zhang, R., Zhao, C.-Z., Ren, J.-W., Wei, J., Zhao, Z.-Y., Ni, C.-Y., & Lu, T. J. (2023). Dynamic performance of ultralight corrugated sandwich plate with FML face-sheets impacted by FSP-foam composite projectile. *Thin-Walled Structures*, 188, 110875.
- [18] Radeva, V. (2006). Materiales compuestos reforzados con fibra. *Ciencia y Sociedad*, 31(4), 544-564. Instituto Tecnológico de Santo Domingo.
- [19] Rubio Díaz, I. (2021). Análisis experimental y numérico del comportamiento mecánico del material compuesto base aramida empleado en protecciones personales (Tesis de grado). Universidad Carlos III de Madrid.
- [20] Sivagnana Sundaram, A., Eranezhuth, A. A., Krishna, K. V. V. R., Kumar, P. K., & Sivakumar, V. (2017). Ballistic impact performance study on thermoset and thermoplastic composites. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17, 1260–1267.
- [21] Tham, C. Y., Tan, V. B. C., & Lee, H. P. (2007). Ballistic impact of a KEVLAR® helmet: Experiment and simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 35, 304–318.
- [22] U.S. Department of Justice, National Institute of Justice. (1981). *Technology assessment program: NIJ standard for ballistic helmets* (NILECJ-STD-0106.00). National Institute of Justice.

- [23] Vercher Martínez, A. (2023). Tema 1: Materiales compuestos. Clasificación y propiedades [Transparencias]. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Área de Ingeniería Mecánica.
- [24] Vercher Martínez, A. (2023). Tema 2: Aspectos geométricos. Interfase fibra-matriz [Transparencias]. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Área de Ingeniería Mecánica.
- [25] Vercher Martínez, A. (2023). Tema 4: Relaciones  $\sigma$ - $\epsilon$ . Ley de Hooke generalizada [Transparencias]. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Área de Ingeniería Mecánica.
- [26] Zhang, T. G., Satapathy, S. S., Vargas-Gonzalez, L. R., & Walsh, S. M. (2015). Ballistic impact response of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE). *Composite Structures*, 133, 191-201.
- [27] Zheng, T., Guo, L., Huang, J., & Liu, G. (2020). A novel mesoscopic progressive damage model for 3D angle-interlock woven composites. *Composites Science and Technology*, 185, 107894.
- [28] Zhao, X., Li, J., & Wang, Y. (2021). Extension of Tsai-Hill failure concept for mixed-mode I/II fracture investigation of orthotropic materials considering T-stress effects. *International Journal of Solids and Structures*, 302, 112991.
- [29] Gómez-Martínez, S., de Santos, R., Infante-García, D., & Marco, M. (2022). Calibración de coeficientes visco-hiperelásticos para modelos constitutivos de gelatina balística por medio de algoritmos genéticos y su aplicación en impactos balísticos en tórax. En XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.

## 9. Apéndices

### 9.1. Apéndice 1: Abaqus/Explicit

Para la realización del trabajo se ha utilizado el *software* Abaqus, el cuál posee diversas herramientas para el cálculo de problemas dinámicos. La elección de estas herramientas de cálculo depende en gran medida del tipo de problema que se pretende analizar. En el caso de este trabajo se utiliza el método de análisis dinámico explícito implementado en el módulo Abaqus/Explicit [5], que se basa en una regla de integración explícita. Este módulo destaca por su efectividad para analizar problemas dinámicos no lineales ya que utiliza integración directa.

Las ecuaciones del movimiento que definen este módulo son:

$$u^{(i+1)} = u^i + \Delta t^{(i+1)} * \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} \quad (27)$$

$$\dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} * \ddot{u}^i \quad (28)$$

Donde  $\dot{u}$  y  $\ddot{u}$  son la velocidad y la aceleración. El índice  $i$  hace referencia al número de *frame* en el que se encuentra dentro del *step*, que es el tiempo que tarda en realizarse la simulación. Se puede apreciar que, en las ecuaciones cinemáticas, el incremento  $i+1$  se obtiene a partir del incremento o *frame* anterior calculado por el sistema.

Para evaluar el rendimiento computacional de este método, resulta fundamental emplear matrices de masa diagonales para los elementos involucrados. La ventaja de utilizar una matriz de masas diagonal es que su inversa se obtiene simplemente invirtiendo cada uno de sus elementos de su diagonal, evitando así el proceso computacionalmente costoso de invertir toda la matriz.

Como resultado, la ecuación que describe la aceleración en cada paso temporal queda simplificada a la siguiente ecuación:

$$\ddot{u}^{(i+1)} = M^{-1} * (F^i - I^i) \quad (29)$$

Donde  $M$  es la matriz de masas global,  $F$  el vector de fuerzas aplicadas e  $I$  el vector de fuerzas internas.

Por otro lado, para evaluar la estabilidad del método explícito de Abaqus, se emplea la condición de Courant. Abaqus/Explicit requiere, por lo general, incrementos de tiempo muy pequeños para alcanzar la estabilidad. Por otra parte, el operador de diferencias centrales es condicionalmente estable, siempre que se utilice un incremento temporal que cumpla la condición de Courant. Esta condición queda descrita en las Ecuaciones (30) y (31) a partir de la frecuencia más alta del sistema.

- Sin amortiguamiento:

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{max}} \quad (30)$$

- Con amortiguamiento:

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{max} * (1 + \zeta)} \quad (31)$$

Donde  $w$  es la frecuencia y  $\zeta$  es la fracción de amortiguamiento crítico en el modo de la frecuencia más alta. La introducción de amortiguamiento en la simulación reduce el incremento de tiempo estable. A pesar de ello, Abaqus/Explicit introduce una pequeña cantidad de amortiguamiento en forma de viscosidad volumétrica para controlar las oscilaciones de alta frecuencia.

Para aproximarse al límite de estabilidad y atravesar cualquiera de los elementos de una malla, se hace una aproximación mediante el tiempo de tránsito más pequeño de una onda de dilatación:

$$\Delta t = \frac{l_{min}}{c_d} \quad (32)$$

Donde  $l_{min}$  es la dimensión más pequeña del elemento de la malla y  $c_d$  es la velocidad de la onda de dilatación a lo largo del material. Esta velocidad viene determinada por la siguiente expresión:

(33)

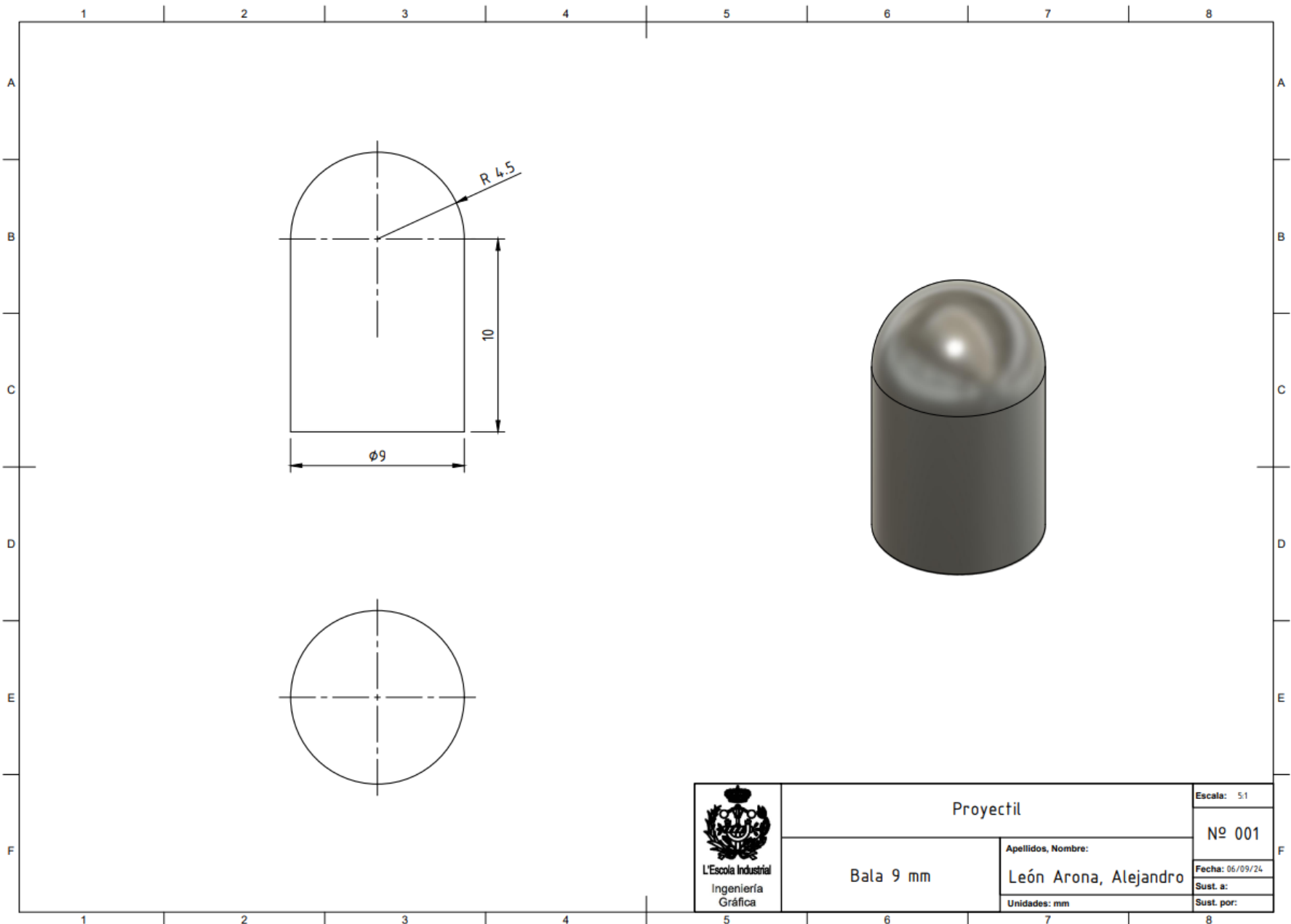
$$c_d = \sqrt{\frac{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}{\rho}}$$


Donde  $\hat{\lambda}$  y  $\hat{\mu}$  son las constantes de Lamé que definen los términos de Módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

Finalmente, con lo visto de este módulo se puede concluir que el incremento de tiempo en un análisis explícito puede ser muy pequeño si la malla contiene elementos con un tamaño muy reducido.



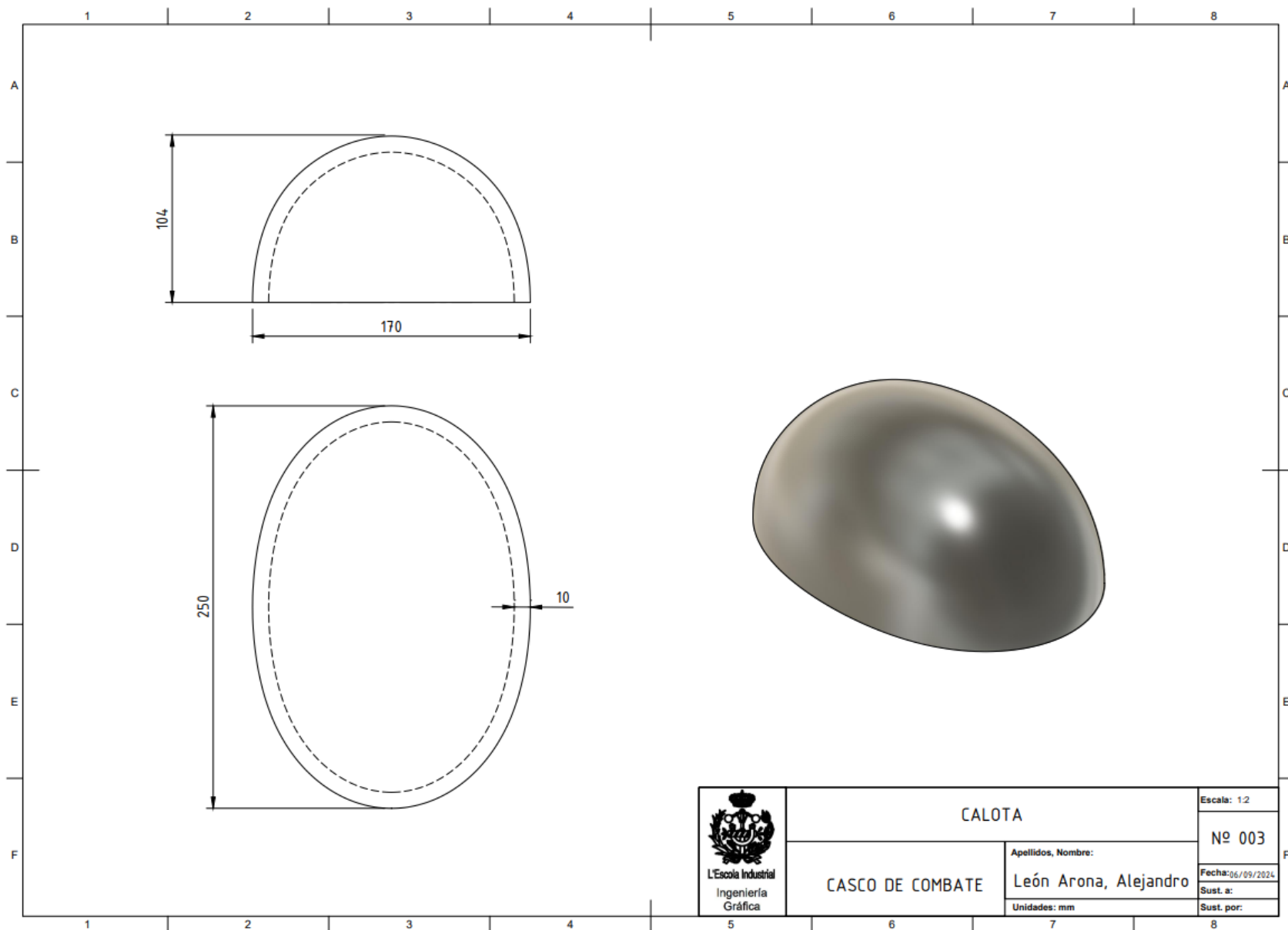
# PLANOS



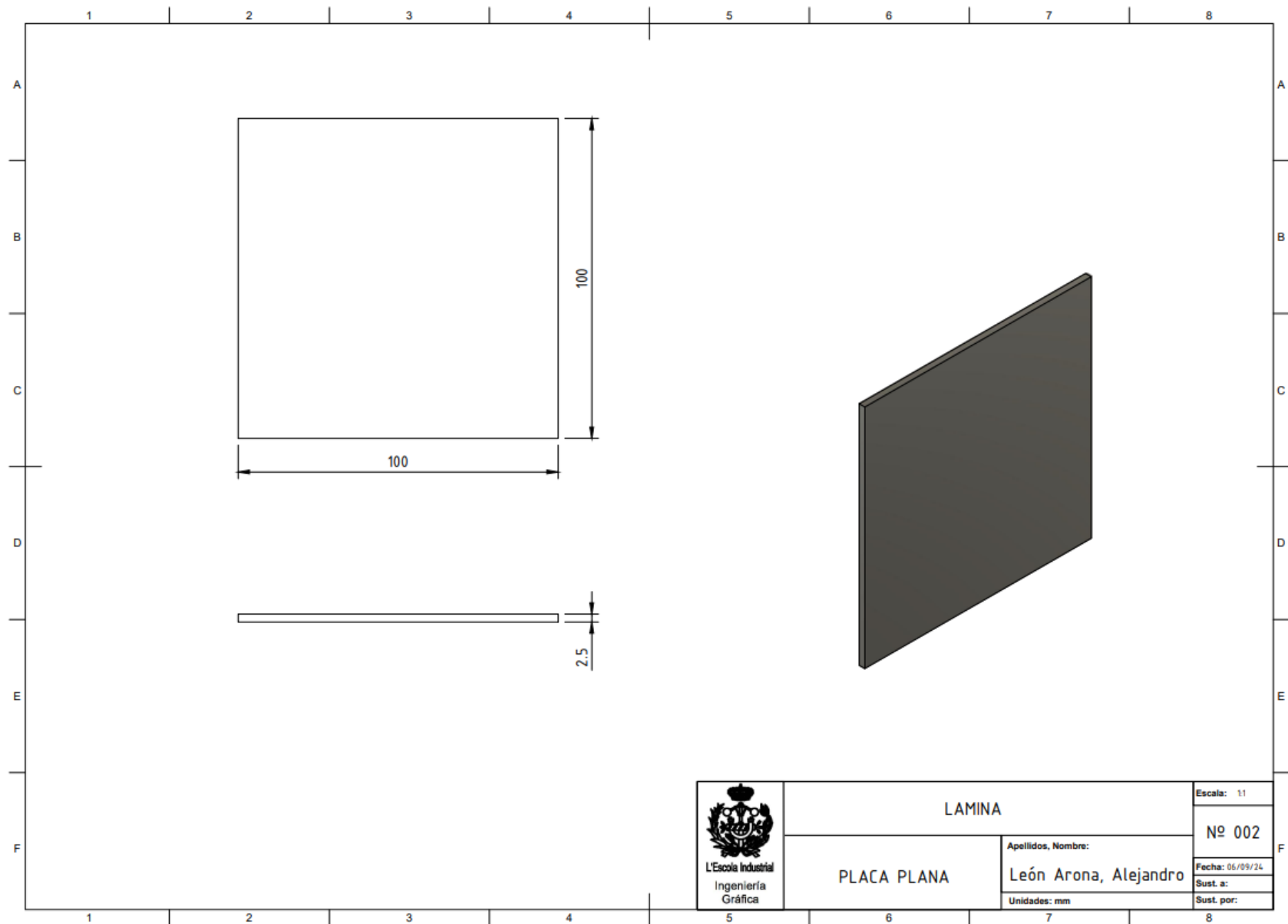
 L'Escola Industrial Ingeniería Gráfica	Proyectil		Escala: 5:1
	Bala 9 mm		Nº 001
			Fecha: 06/09/24
	Apellidos, Nombre: León Arona, Alejandro		Sust. a:
Unidades: mm		Sust. por:	




# Diseño de un casco de combate fabricado con materiales compuestos



# Diseño de un casco de combate fabricado con materiales compuestos



 <p>L'Escola Industrial Ingenieria Gráfica</p>	LAMINA		Escala: 1:1
	PLACA PLANA	Apellidos, Nombre:	Nº 002
		León Arona, Alejandro	Fecha: 06/09/24
		Unidades: mm	Sust. a:
		Sust. por:	



# PLIEGO DE CONDICIONES

# Índice

1. Introducción .....	77
2. Especificaciones informáticas.....	77

## 1. Introducción

En este capítulo se detallan las especificaciones técnicas de los equipos utilizados para asegurar el correcto desarrollo del proyecto. Se describen las capacidades y funcionalidades de los diversos medios utilizados.

## 2. Especificaciones informáticas

En este apartado se detallan las especificaciones informáticas para la realización del proyecto. Se describen las capacidades y funcionalidades del hardware y software empleados.

Los distintos recursos utilizados de *hardware* para el proyecto son los siguientes:

- Ordenador personal: para el uso de distintos programas de postproceso de datos y redacción se ha utilizado un ordenador personal con procesador a 4600 Hz de 16 GB de memoria RAM.
- Ordenador del departamento: para el uso del programa de cálculo por medio de elementos finitos, se ha utilizado un ordenador del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universitat Politècnica de Valencia con un procesador i7 a 2 GHz de 32 GB de memoria RAM.

Por otro lado, los recursos de *software* utilizados son los siguientes:

- Sistema operativo: El sistema operativo empleado es Windows 10.
- Software de simulación de elementos finitos: Para el uso del programa de simulación de elementos finitos se ha necesitado la licencia académica, comprada por el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universitat Politècnica de Valencia. Este *software* incluye un módulo de cálculo explícito para el cálculo de las simulaciones.
- Office: se ha ejecutado mediante la licencia de estudiante comprada por la Universitat Politècnica de Valencia.



# PRESUPUESTO

# Índice

1. Introducción .....	80
1.1. Coste mano de obra.....	80
1.2. Coste informático .....	81
1.3. Coste total.....	81
2. Referencias .....	81

# Índice de tablas

Tabla 1.1.1. Bases de cotización española .....	80
Tabla 1.1.2. Salarios estimados .....	80
Tabla 1.1.3. Mano de obra y coste asociado .....	80
Tabla 1.3.1. Costes del proyecto .....	81

## 1. Introducción

En este capítulo se muestra un análisis financiero del coste del proyecto realizado. Para realizar esta tarea se considera el coste de la mano de obra y el coste informático.

### 1.1. Coste mano de obra

Para la ejecución de este proyecto, la mano de obra incluye un ingeniero, encargado de llevar a cabo las tareas técnicas, así como por los tutores, cuya función ha sido proporcionar orientación experta y realizar una revisión del avance y la calidad del trabajo.

Para estimar el salario mensual de los integrantes del proyecto, se han revisado la cotización española del año 2024 [1].

	Ingenieros y licenciados
Base mínima mensual (€)	1847.40
Base máxima mensual (€)	4720.50

Tabla 1.1.1. Bases de cotización española

Dentro de este proyecto, los tutores del proyecto se han considerado como Ingenieros titulados. En base a lo visto en la tabla anterior, en la Tabla 1.1.2. se han estimado los salarios brutos mensuales.

	Ingeniero	Tutores
Salario mensual (€)	2.640	3.450

Tabla 1.1.2. Salarios estimados

Tras estimar el salario, en la tabla 1.1.3. se muestran las horas de trabajo por cada parte de los integrantes del proyecto, así como el coste por las horas de trabajo realizadas.

Ingeniero			
	Tiempo (h)	Coste/h (€)	Coste (€)
Documentación	85	16.50	1.402,50
Simulación	200	16.50	3.300
Redacción	75	16.50	1.237,50
Directores			
	Tiempo (h)	Coste/h (€)	Coste (€)
Orientación y revisión	40	21.60	864
Coste total			4.739,50

Tabla 1.1.3. Mano de obra y coste asociado



## 1.2. Coste informático

Para llevar a cabo el proyecto, se han utilizado varios programas informáticos, como Office para la redacción de documentos y Abaqus 6.12 para las simulaciones. Aunque la mayoría de las licencias se han obtenido de manera gratuita a través de la universidad, Abaqus requiere un pago por su licencia. La licencia de Abaqus se ha utilizado durante aproximadamente seis meses, lo que ha supuesto un coste de 1.647€.

## 1.3. Coste total

En la Tabla 1.3.1. se muestra el coste aproximado de la realización del proyecto:

	Coste (€)
Mano de obra	4.739,50
Adquisición de licencias	1.647
<b>COSTE TOTAL</b>	<b>6.386,50</b>

Tabla 1.3.1. Costes del proyecto

## 2. Referencias

[1] Seguridad Social: Cotización / Recaudación de Trabajadores /

<https://www.seg-social.es/wps/portal/wss/internet/Trabajadores/CotizacionRecaudacionTrabajadores/10721/10957/9932/4327>