



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Rediseño y optimización del proceso de fabricación de una  
prenda de protección balística.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Seguí Ibáñez, Javier

Tutor/a: Montañés Muñoz, Néstor

Cotutor/a: Ivorra Martínez, Juan

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

# Resumen

## **“Rediseño y optimización del proceso de fabricación de una prenda de protección balística”**

El tema propuesto para este Trabajo de Fin de Grado es el de un rediseño de un chaleco antibalas, el cual se ha centrado en la comparativa entre dos materiales usados en la actualidad: fibra de poliparafenileno tereftalamida, también conocido como Kevlar, y fibra de polietileno de ultra alto peso molecular, también con nombrado como UHMWPE por sus siglas en inglés. Se ha pretendido comprobar si el UHMWPE presente unas prestaciones mejoradas para su uso en este tipo de prendas y ofrece otras cualidades atractivas para dicha aplicación, como, por ejemplo, una disminución de la masa del chaleco, en comparación con el tradicional chaleco de Kevlar.

El presente proyecto contempla diversas disciplinas en el ámbito de la Ingeniería Mecánica: prediseño y optimización de diseños mediante análisis y simulaciones, estudio de deformaciones, dimensionamiento final, selección de materiales, pre-estudio de fabricación y pre-análisis de costes.

El análisis principal de este proyecto se ha realizado mediante simulaciones por el Método de Elementos Finitos (FEM) con el software Ansys Workbench, además de haberse recopilado gran parte de la información relativa a la selección de materiales y de procesos de fabricación a través del software Granta EduPack. Todo ello ha permitido realizar la comparativa de materiales y corroborar que el UHMWPE es una alternativa algo más resistente, más ligera y su fabricación a gran escala es rentable económicamente.



# Summary

## **“Redesign and optimisation of the manufacturing process for a ballistic protective clothing”**

The topic proposed for this Final Degree Project is the redesign of a bulletproof vest, which has focused on the comparison between two materials currently used: polyparaphenylene terephthalamide fibre, also known as Kevlar, and ultra-high molecular weight polyethylene fibre, also known as UHMWPE. The aim was to test whether UHMWPE has improved performance for use in this type of garment and offers other attractive qualities for this application, such as a reduction in the mass of the waistcoat compared to the traditional Kevlar waistcoat.

This project contemplates various disciplines in the field of Mechanical Engineering: pre-design and optimisation of designs by means of analysis and simulations, study of deformations, final sizing, selection of materials, pre-study of manufacture and pre-analysis of costs.

The main analysis of this project has been carried out by means of Finite Element Method (FEM) simulations with Ansys Workbench software, in addition to compiling a large part of the information relating to the selection of materials and manufacturing processes using Granta EduPack software. All this has allowed the comparison of materials and corroboration that UHMWPE is a slightly stronger, lighter alternative and that its large-scale manufacture is economically profitable.



# Resum

## **“Redisseny i optimització del procés de fabricació d'una peça de protecció balística”**

El tema proposat per a aquest Treball de Fi de Grau és el d'un redisseny d'un jupetí antibales, el qual s'ha centrat en la comparativa entre dos materials usats en l'actualitat: fibra de poliparafenilen tereftalamida, també conegut com Kevlar, i fibra de polietilè d'ultra alt pes molecular, també amb nomenat com UHMWPE per les seues sigles en anglés. S'ha pretés comprovar si el UHMWPE presenta unes prestacions millorades per al seu ús en aquesta mena de peces i ofereix altres qualitats atractives per a aquesta aplicació, com, per exemple, una disminució de la massa del jupetí, en comparació amb el tradicional jupetí de Kevlar.

El present projecte contempla diverses disciplines en l'àmbit de l'Enginyeria Mecànica: predisseny i optimització de dissenys mitjançant anàlisis i simulacions, estudi de deformacions, dimensionament final, selecció de materials, pre-estudi de fabricació i pre-anàlisi de costos.

L'anàlisi principal d'aquest projecte s'ha realitzat mitjançant simulacions pel Mètode d'Elements Finitos (FEM) amb el programari Ansys Workbench, a més d'haver-se recopilat gran part de la informació relativa a la selecció de materials i de processos de fabricació a través del programari Granta EduPack. Tot això ha permés realitzar la comparativa de materials i corroborar que el UHMWPE és una alternativa una mica més resistent, més lleugera i la seua fabricació a gran escala és rendible econòmicament.



# Abreviaturas

A	Área
AP	Antiblandaje
APDS	Antiblandaje con sabot desechable
B4C	Carburo de Boro
BFD	Deformación de la Cara Posterior
BFS	Deformación de la Cara Posterior
BL	Límite Balístico
Bo	Carburo de Boro (invención propia para su uso en las simulaciones)
BOE	Boletín Oficial del Estado
CAD	Diseño asistido por ordenador
CIM	Moldeo por inyección de cerámicos
DAPS	Sistema de Protección de Deltoides y Axilas
DHA	Blindaje de dureza dual
<i>e</i>	Espesor
ESAPI	Inserto de Protección contra Armas Ligeras Mejorado
ESBI	Inserto Balístico Lateral Mejorado
<i>F</i>	Fuerza
FEM	Método de los Elementos Finitos
FMJ	Camisa metálica (munición)
HBW	Dureza Brinell con bola de carburo
HDPE	Poliétileno de Alta Densidad
HHA	Acero de alta dureza
HIP	Prensado isostático en caliente
HRB	Dureza Rockwell B
HRC	Dureza Rockwell C
IBA	Blindaje corporal interceptor
IOTV	Chaleco Táctico Externo Mejorado
JSP	Punta Blanda Encamisada (munición)
Ke	Kevlar (invención propia para su uso en las simulaciones)
<i>m</i>	Masa
NIJ	Instituto Nacional de Justicia (de los Estados Unidos)
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
OTV	Chaleco Táctico Externo
PASGT	Sistema de blindaje de personal para tropas terrestres
P-BFS	Perforación-Deformación de la Cara Posterior
Pe	UHMWPE (invención propia para su uso en las simulaciones)
PE	Poliétileno
PVA	Acetato de polivinilo
RBA	Blindaje corporal de los comandos



RHA	Blindaje laminado homogéneo
RN	Punta Redonda (munición)
S&W	Smith & Wesson (Fabricante)
SAPI	Inserto de Protección contra Armas Ligeras
SJHP	Punta Hueca Semi-Encamisada
STANAG	Acuerdo de Estandarización (en la OTAN)
$t$	tiempo
TFG	Trabajo de Final de Grado
ud	unidad
UHHA	Blindaje de ultra alta dureza
UHMWPE	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
UV	Ultravioleta
$V$	Volumen
$v$	velocidad
V-50	Ensayo balístico de velocidad para una probabilidad de penetración del 50%
VAN	Valor actualizado neto
XSAPI	Inserto de Protección contra Armas Ligeras y amenazas X
$\alpha$	aceleración
$\rho$	Densidad

# Índice

Resumen .....	1
Summary .....	3
Resum .....	5
Abreviaturas.....	7
Listado de ilustraciones.....	14
LISTADO DE TABLAS .....	20
<b>I. Introducción .....</b>	<b>22</b>
<b>I.1. Antecedentes .....</b>	<b>23</b>
<b>I.2. Historia.....</b>	<b>23</b>
<b>I.3. Materiales recientes (1990 - actualidad) .....</b>	<b>27</b>
I.3.1. Kevlar.....	27
<b>I.3.2. UHMWPE.....</b>	<b>29</b>
I.3.3. Zylon.....	32
I.3.4. Dragon Skin.....	33
<b>I.4. Configuraciones de chalecos usados en la actualidad .....</b>	<b>35</b>
I.4.1. Protección balística hasta el 2000 .....	35
I.4.1.1. PASGT.....	35
I.4.1.2. RBA .....	36
I.4.2. Refuerzos balísticos.....	37
I.4.2.1. Placas metálicas.....	38
I.4.2.2. Placas cerámicas .....	42
I.4.3. Protección balística desde el 2000 hasta la actualidad.....	45
I.4.3.1. IBA .....	45
I.4.3.2. IOTV .....	46

<b>II. Objetivos.....</b>	<b>48</b>
<b>II.1. Objetivos generales.....</b>	<b>49</b>
<b>II.2. Objetivos particulares.....</b>	<b>49</b>
<b>III. Desarrollo del proyecto .....</b>	<b>50</b>
<b>III.1. Resumen del apartado A.1. Normativa aplicable .....</b>	<b>51</b>
<b>III.2. Resumen del apartado A.2. Diseño.....</b>	<b>52</b>
<b>III.3. Selección de materiales .....</b>	<b>54</b>
III.3.1. Materiales empleados en la munición.....	54
III.3.2. Materiales empleados en el blindaje flexible .....	55
III.3.3. Materiales empleados en el blindaje rígido .....	56
III.3.4. Propiedades mecánicas de los materiales seleccionados.....	60
<b>III.4. Resumen del anexo A.4. Desarrollo.....</b>	<b>62</b>
<b>III.5. Diseño final. ....</b>	<b>64</b>
<b>III.6. Resumen del anexo A.5. Fabricación.....</b>	<b>66</b>
<b>III.7. Resumen del anexo A.6. Estudio económico .....</b>	<b>68</b>
<b>III.8. Conclusiones .....</b>	<b>70</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>71</b>
<b>A.1. Normativa aplicable.....</b>	<b>72</b>
A.1.1. NIJ 0101.06 .....	72
A.1.2 Requisitos de las muestras y configuración del laboratorio.....	75
A.1.2.1 Muestras del ensayo. ....	75
A.1.2.2 Condiciones de ensayo .....	77
A.1.2.3 Protocolo de acondicionamiento para blindaje flexible.....	78
A.1.2.4 Protocolo de acondicionamiento para blindaje rígido.....	79
A.1.2.5 Métodos de ensayo balístico .....	82

A.1.2.6 Ensayo P-BFS.....	84
A.1.2.7 Ensayo de Límite Balístico.....	87
<b>A.2. Diseño.....</b>	<b>92</b>
A.2.1. Diseño general.....	92
A.2.1.1. Diseño de la munición.....	92
A.2.1.1.1. Diseño del núcleo.....	93
A.2.1.1.2. Diseño del recubrimiento.....	95
A.2.1.1.3. Ensamblaje final de los componentes de la bala.....	96
A.2.1.1.4. Diseño simplificado de la munición.....	97
A.2.1.2. Diseño del chaleco.....	98
A.2.1.2.1. Diseño del blindaje flexible.....	99
A.2.1.2.2. Diseño del blindaje rígido.....	103
A.2.1.2.3. Ensamblaje de los componentes del chaleco.....	105
<b>A.2.2. Diseños simplificados.....</b>	<b>108</b>
A.2.2.1. Diseño para la simulación dinámica con material ortotrópico.....	108
A.2.2.2. Diseño para la simulación dinámica con materiales isotrópicos..	109
A.2.2.3. Diseño para las simulaciones estáticas.....	111
<b>A3. Cálculos.....</b>	<b>114</b>
<b>A4. Desarrollo.....</b>	<b>116</b>
<b>A.4.1. Estudio y definición de estados tensionales.....</b>	<b>116</b>
A.4.1.1 Cálculo experimental del tiempo hasta el impacto.....	117
<b>A.4.2 Simulación mediante FEM.....</b>	<b>119</b>
A.4.2.1. Modelo dinámico y dificultades encontradas.....	120
A.4.2.2. Modelado dinámico con estructura ortotrópica para el chaleco ..	120
A.4.2.3. Modelado dinámico con estructura isotrópica para el chaleco.....	127
A.4.2.4. Modelo estático.....	131

A.4.2.4.1. Aplicación de condiciones de contorno.....	132
A.4.2.4.2. Aplicación de materiales .....	134
A.4.2.4.3. Aplicación de estados tensionales .....	136
A.4.2.5. Análisis de deformaciones .....	138
<b>A.5. Fabricación.....</b>	<b>142</b>
<b>A.5.1. Selección de procesos de fabricación.....</b>	<b>142</b>
A.5.1.1. Procesos de fabricación para el blindaje rígido .....	142
A.5.1.1.1. Obtención de polvos cerámicos.....	143
A.5.1.1.2. Prensado isostático en caliente .....	144
A.5.1.1.4. Moldeo por inyección de cerámicos.....	145
A.5.1.2. Procesos de fabricación para el blindaje flexible .....	148
A.5.1.2.1. Extrusión de polímeros .....	149
A.5.1.2.2. Hilatura en gel de polímeros .....	150
A.5.1.2.3. Proceso de laminado.....	151
A.5.1.2.4. Procesos de corte para el blindaje flexible.....	153
<b>A.5.2. Procesos de fabricación seleccionados.....</b>	<b>155</b>
<b>A.6. Estudio económico .....</b>	<b>158</b>
<b>A.6.1. Estudio económico para la fabricación del blindaje rígido ...</b>	<b>158</b>
A.6.1.1. Capital inicial para la fabricación del blindaje rígido .....	159
A.6.1.2. Materia prima para la fabricación del blindaje rígido .....	159
A.6.1.3. Costes variables para la fabricación del blindaje rígido .....	160
A.6.1.4. Mano de obra para la fabricación del blindaje rígido .....	161
A.6.1.5. Capacidad de producción del blindaje rígido. ....	161
<b>A.6.2. Estudio económico para la fabricación del blindaje flexible.</b>	<b>162</b>
A.6.2.1. Capital inicial para la fabricación del blindaje flexible.....	162
A.6.2.2. Materia prima para la fabricación del blindaje flexible .....	163

A.6.2.3. Costes variables para la fabricación del blindaje flexible .....	164
A.6.2.4. Mano de obra para la fabricación del blindaje flexible .....	164
A.6.2.5. Capacidad de producción del blindaje flexible .....	165
<b>A.6.3. Cálculo del Valor Actualizado Neto (VAN).....</b>	<b>165</b>
A.6.3.1. Cálculo de costes de fabricación, precio de venta y el VAN .....	166
<b>A.7. Presupuesto.....</b>	<b>170</b>
A.7.1. Cuadro de precios.....	170
A.7.2. Presupuesto y mediciones .....	171
<b>A.8. Bibliografía.....</b>	<b>174</b>

# Listado de ilustraciones

Ilustración 1. Fórmula química del Kevlar.....	27
Ilustración 2. Reacción química para la obtención del Kevlar.....	28
Ilustración 3. Maquinaria de hilado de Kevlar en formato tela.....	28
Ilustración 4. Estructura molecular del UHMWPE.....	30
Ilustración 5. Diversas morfologías en la estructura molecular del UHMWPE.....	31
Ilustración 6. Logotipos de Dyneema y Spectra.....	32
Ilustración 7. Fórmula química del Zylon.....	33
Ilustración 8. Bobina de Zylon con publicidad de Toyobo Global.....	33
Ilustración 9. Radiografía junto con imagen del chaleco Dragon Skin.....	34
Ilustración 10. Soldado vistiendo el chaleco y el casco de Kevlar de su PASGT.....	36
Ilustración 11. Imagen de las placas cerámicas, a), junto con un soldado vistiendo el equipamiento RBA, b).....	37
Ilustración 12. Imagen del impacto de dos balas desde las perspectivas frontal y trasera.[8].....	38
Ilustración 13. Ejemplo de un vehículo de combate con blindaje RHA en el videojuego War Thunder.....	39
Ilustración 14. Ejemplo de un vehículo de combate con blindaje HHA en el videojuego War Thunder.....	40
Ilustración 15. Fractura en una placa de armadura cerámica tras un impacto de bala..	42
Ilustración 16. Interior de una placa cerámica 6B45 "Granit" Gost 5A/6A.[11].....	43
Ilustración 17. Imagen de un SAPI tamaño L desde las perspectivas frontal y trasera.	44
Ilustración 18. Imagen de un ESAPI desde las perspectivas frontal y trasera.....	44
Ilustración 19. Imagen de un ESBI desde las perspectivas frontal y trasera.....	45
Ilustración 20. Esquema del equipamiento IBA desglosado, siendo usado por un soldado.....	46

Ilustración 21. Esquema del equipamiento IOTV desglosado, siendo usado por un soldado.....	47
Ilustración 22. Composición química y propiedades mecánicas del acero Armox Advance.....	57
Ilustración 23. Primera etapa de la selección del acero. Gráfica de Densidad vs Precio por unidad de masa.....	57
Ilustración 24. Segunda etapa de la selección del acero. Gráfica de Tenacidad vs Dureza Vickers .....	58
Ilustración 25. Primera etapa de la selección del carburo de boro. Gráfica de Dureza Vickers vs Tensión a Compresión.....	59
Ilustración 26. Segunda etapa de la selección del carburo de boro. Gráfica de Tenacidad vs Densidad.....	59
Ilustración 27. Esquema de los requisitos de instalación de los equipos para la homologación bajo norma NIJ 0101.06.....	78
Ilustración 28. Ejemplo de un dispositivo válido para la prueba de caída para placas .	82
Ilustración 29. Esquema de un chaleco y los aspectos a tener en cuenta sobre la localización del disparo .....	84
Ilustración 30. Diseño final de la bala de 7,62x51 OTAN M80.....	93
Ilustración 31. Croquis y diseño final del núcleo de la munición de 7,62x51 OTAN M80 .....	94
Ilustración 32. Croquis y diseño final del recubrimiento de la munición de 7,62x51 OTAN M80.....	96
Ilustración 33. Vista de sección del ensamblaje de los componentes la munición de 7,62x51 OTAN M80.....	97
Ilustración 34. Diseño final simplificado de la munición.....	98
Ilustración 35. Croquis del blindaje flexible.....	99
Ilustración 36. Parámetros configurados para la flexión del diseño por la zona pectoral.....	100



Ilustración 37. Parámetros configurados para la flexión del diseño por la zona costal. .....	100
Ilustración 38. Creación del plano de recorte y su posterior uso con la herramienta “Partir” .....	101
Ilustración 39. Parámetros configurados para la flexión del diseño por la zona del pectoral superior-trapecio .....	102
Ilustración 40. Diseño final del blindaje flexible .....	102
Ilustración 41. Placa SAPI de la marca Militech de tamaño con L con sus dimensiones principales .....	103
Ilustración 42. Croquis del blindaje rígido .....	104
Ilustración 43. Parámetros configurados para la flexión de la placa de refuerzo.....	104
Ilustración 44. Diseño final del blindaje rígido .....	105
Ilustración 45. Aplicación de la simetría de componentes durante el ensamblado del chaleco completo.....	106
Ilustración 46. Diseño final del conjunto del chaleco ensamblado.....	107
Ilustración 47. Vista de sección del diseño final del conjunto del chaleco ensamblado	107
Ilustración 48. Diseño final simplificado para la simulación dinámica con materiales ortotrópicos .....	109
Ilustración 49. Diseño final simplificado para la simulación dinámica con materiales isotrópicos.....	111
Ilustración 50. Diseño final simplificado para la simulación estática .....	112
Ilustración 51. Imagen del modelo e instante inicial del contacto .....	118
Ilustración 52. Imagen del modelo e instante final del contacto.....	118
Ilustración 53. Conexión de los módulos ACP (Pre) con Explicit Dynamics.....	121
Ilustración 54. Ejemplo de configuración para material isotrópico. Caso del acero Armox Advance.....	122
Ilustración 55. Ejemplo de configuración para material ortotrópico. Caso del UHMWPE. .....	122

Ilustración 56. Tabla para la configuración de la matriz de rigidez en materiales anisotrópicos. ....	123
Ilustración 57. Imagen de la matriz de rigidez simplificada para materiales ortotrópicos. ....	123
Ilustración 58. Árbol de configuración del módulo ACP (Pre).....	124
Ilustración 59. Tabla de configuración para el apilado de materiales con distinta orientación de las fibras .....	124
Ilustración 60. Imagen del diseño final desde el módulo ACP (Pre).....	125
Ilustración 61. Árbol de configuración del módulo Explicit Dynamics. ....	126
Ilustración 62. Imagen del modelo dinámico con material ortotrópico antes de iniciarse la simulación.....	126
Ilustración 63. Imagen del modelo dinámico con material ortotrópico instantes después de iniciarse la simulación .....	127
Ilustración 64. Imagen del módulo Explicit Dynamics en el modelo dinámico con materiales isotrópicos. ....	128
Ilustración 65. Imagen de la configuración de velocidad inicial en el modelo dinámico con materiales isotrópicos. ....	129
Ilustración 66. Mallado en el modelo dinámico con materiales isotrópicos. ....	130
Ilustración 67. Resultados incoherentes en una de las simulaciones con materiales isotrópicos.....	130
Ilustración 68. Imagen del árbol de configuración del módulo Static Structural en el modelo estático.....	131
Ilustración 69. Mallado en el modelo estático .....	132
Ilustración 70. Configuración de las regiones de contacto.....	133
Ilustración 71. Configuración de los elementos de fijación.....	134
Ilustración 72. Gráfica de Tensión-Deformación generada tras configurar la plasticidad del material.....	135
Ilustración 73. Configuración de la asignación de materiales .....	136

Ilustración 74. Opciones de configuración para la aplicación de una fuerza .....	137
Ilustración 75. Aplicación de la fuerza en el modelo según una configuración tabular de datos.....	137
Ilustración 76. Deformación del modelo de la simulación 2.....	138
Ilustración 77. Deformación en la capa posterior del modelo de la simulación 2.....	139
Ilustración 78. Deformación del modelo de la simulación 7.....	139
Ilustración 79. Deformación en la capa posterior del modelo de la simulación 7.....	140
Ilustración 80. Proceso de selección de métodos de fabricación para el blindaje rígido. .....	143
Ilustración 81. Esquema de un horno de arco eléctrico.....	144
Ilustración 82. Esquema de una cámara de prensado isostático en caliente.....	145
Ilustración 83. Esquema del proceso de inyección de materiales cerámicos. ....	147
Ilustración 84. Proceso de selección de métodos de fabricación para el blindaje flexible. .....	148
Ilustración 85. Esquema de una extrusora de polímeros .....	149
Ilustración 86. Esquema del proceso de hilado en gel para el UHMWPE. ....	151
Ilustración 87. Proceso de preimpregnado manual .....	153
Ilustración 88. Proceso de selección de métodos de corte para el blindaje flexible.....	154
Ilustración 89. Proceso de corte por chorro de agua visto desde una máquina real. ....	154
Ilustración 90. Diseño del chaleco para el patrón de corte por chorro de agua.....	155
Ilustración 91. Calculadora de costes energéticos para una fabricación CIM.[28] .....	160
Ilustración 92. Ecuación del VAN.....	166



# LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de los aceros RHA seleccionados.....	40
Tabla 2. Propiedades de los aceros HHA seleccionados.....	41
Tabla 3. Propiedades de los aceros UHHA seleccionados.....	41
Tabla 4. Propiedades de los materiales seleccionados.....	61
Tabla 5. Condiciones del ensayo de ciclo térmico.....	80
Tabla 6. Resumen de los requisitos para la ejecución de la prueba P-BFS.....	86
Tabla 7. Resumen de los aspectos estándar para la determinación de Límite Balístico.....	88
Tabla 8. Parámetros y requisitos de ensayo para la prueba de límite balístico.....	89
Tabla 9. Datos finales obtenidos con las simulaciones.....	140
Tabla 10. Costes de fabricación según el artículo por cada año del estudio.....	168
Tabla 11. Cálculo del VAN para ambos artículos.....	169



# I. Introducción

## Introducción

# I.1. Antecedentes

El chaleco antibalas es una prenda de protección balística que se coloca sobre el pecho con tal de proteger los órganos vitales de un impacto de bala o metralla de un explosivo. La necesidad de su uso, tal y como se justificará y expondrá a lo largo de este apartado, radica en los grandes avances que a lo largo de la historia ha sufrido las armas convirtiéndose cada vez en más letales.

# I.2. Historia

Desde la prehistoria (6000 a.C.), el ser humano ha ingeniado todo tipo de herramientas para infligir daños, o, incluso la muerte, a otros individuos o seres de otras especies. En sus inicios, se empleaban armas blancas y armas contundentes, las cuales permitían cazar animales de forma más eficaz y se confeccionaban a partir de palos y piedras, a las cuales se les daba una forma puntiaguda mediante la fricción con otras rocas con tal de generar un filo punzante y cortante, en el caso de las armas blancas, o una superficie roma y maciza en el caso de las armas contundentes. Posteriormente, apareció la primera arma a distancia, como es el caso del arco y la flecha, los cuales aportan la gran ventaja de la distancia y la estrategia a la hora de dar caza a un objetivo. A pesar de requerirse una buena puntería y habilidad para usar efectivamente un arco, o cualquier otra arma a distancia, dicho tipo de armamento, por lo general, aporta mayor energía al impacto que el que pueda producirse a manos de un arma cortante; por lo que las armas a distancia, dependiendo de la distancia, podrían resultar más mortíferas que las armas blancas.

Más tarde, con el descubrimiento de los metales y las técnicas de fabricación adecuadas para ellos, se empezaron a crear espadas, lanzas y multitud de armas de hierro, además del perfeccionamiento de los arcos compuestos y la aparición de las ballestas, balistas y otras armas de proyectiles. Con tal de dar solución a la amenaza que suponían las armas, se empezaron a crear atuendos de protección confeccionados con determinados materiales limitados a su época.

En sus orígenes, en Oriente Próximo a partir del año 2000 a.C., las armaduras empezaron a crearse a partir de cuero endurecido, y, en determinadas ocasiones, presentaban refuerzos en forma de placas o escamas de metal.

Algunas civilizaciones como la griega usaban tanto armaduras de cuero o acolchadas como corazas de metal. Un ejemplo de las primeras corazas de metal empleadas por



los griegos fueron los thorax griegos, los cuales eran más pesados que las corazas de cuero y resultaban más costosas de fabricar, pero ofrecían más protección, siendo usadas en ceremonias y desfiles. Fue entre el siglo III a.C. y el siglo II a.C. cuando finalmente la cota de malla sustituyó las armaduras acolchadas, la cual consistía en un tejido de anillitos o cadenitas de acero. Posteriormente, con la llegada de la Edad Media y con posterioridad a las invasiones de los pueblos del Norte y, sobre todo, en la época de las Cruzadas, se hizo común el empleo de la loriga, formada por escamas, o la cota de malla que llevaban los soldados sobre una especie de jubón acolchado, que recibía el nombre de gambesón, cuyo objetivo era mitigar los golpes recibidos.

El máximo blindaje que se podía alcanzar en la Edad Media se consiguió con la fabricación de la armadura de placas de acero, la cual se empezó a usar en el siglo XIV y alcanzó su máximo potencial a finales del siglo XV.

La invención de la pólvora en el siglo IX supuso un punto de inflexión en el mundo de las armas al haberse conseguido crear un explosivo con la suficiente potencia como para lanzar proyectiles a largas distancias y a altas velocidades. No fue hasta principios del siglo XIV cuando se emplearon los primeros cañones metálicos y, a partir de la segunda mitad del siglo XIV, de cuando se dispone mayor cantidad de registros referentes al uso bélico de las armas de fuego. En España, las armas más usadas en sus inicios fueron los arcabuces, que se usaron mayormente entre los siglos XV y XVII, y los mosquetes, cuyo uso data principalmente del siglo XVI al XIX.

A partir del siglo XVII, con la mejora continuada de las armas de fuego, el uso de las armaduras de placas de acero disminuyó considerablemente y, ya en siglo XVIII, solamente los coraceros continuaron usando armadura. Sin embargo, el motivo de su uso cada vez menos recurrente no se debe a la invención de las armas de fuego, ya que una armadura de placas podría detener a una larga distancia un disparo y a una corta distancia podría disminuir la lesión, sino el coste de equipar un ejército con ellas. Con tal de poder entender hasta qué punto el aspecto económico fue tan influyente en el creciente desuso de las armaduras de placas, se ha realizado una comparación de precios con la equivalencia de la moneda del siglo XV y la actual libra esterlina. Según Alan Williams en "*The Knight and the Blast Furnace: A History of the Metallurgy of Armour in the Middle Ages and the Early Modern Period*"[1], el coste de una armadura de placas en Inglaterra era de unas 8.33£ de la época, lo cual equivaldría al sueldo de 166 días de trabajo. Comparando el valor de la moneda de entonces con el valor actual del dólar americano, comprar una armadura en aquellos tiempos supondría un coste de entre 8000\$ y 40.000\$ actuales; sin embargo, si se tiene en cuenta el coste de las armaduras de los caballeros con títulos nobiliarios, los cuales tenían armaduras ornamentadas de la máxima calidad y fabricadas por los mejores artesanos, estas podían ascender hasta los actuales 100.000\$ e incluso hasta los 250.000\$. Esto puede ayudar a concebir una imagen del desorbitado coste de

adquisición de unas prendas que, aun siendo útiles a largas distancias contra las nuevas armas de fuego, estaban empezando a ser demasiado costosas para la funcionalidad que tenían.

A medida que las armas de fuego iban evolucionando, la necesidad de crear una protección más eficaz contra ellas empezó cada vez más a adquirir mayor importancia. Ya en el siglo XVII se empezaban a apreciar los primeros intentos de confeccionar una armadura a prueba de balas, que fueron protagonizados por Oliver Cromwell y su caballería Ironside con sus cascos *Capeline* y sus corazas a prueba de mosquetes.

Posteriormente, durante la industrialización, destacó el concepto del chaleco balístico blando y ligero. En este aspecto, destacan tres aportaciones importantes: en 1860 el *Myeonje baegab* de los coreanos Kim Gi-Doo y Gang Yoon, formado por 10 capas de tejido de algodón, que fue capturado por los Estados Unidos durante una incursión en la isla de Ganghwa en 1871; el chaleco del físico George E. Goodfellow, confeccionado a partir de 18 a 30 capas de tejido de seda, que fue fruto de su investigación en 1887 a raíz de su artículo "*Impenetrability of Silk to Bullets*"; el chaleco antibalas de seda del sacerdote polaco Kazimierz Żegleń, que usó los descubrimientos de Goodfellow para elaborar una vestimenta que pudiera detener las balas relativamente lentas de las pistolas de pólvora negra.

Durante el siglo XX hubo tres acontecimientos históricos en los que se apreció un esfuerzo económico considerable y en investigación:

- **Primera guerra mundial:**
  - **Bando inglés:** los organismos británicos más destacados en los esfuerzos de diseño y fabricación de chaleco balístico fueron el Experimental Ordnance Board y el Comité de Diseño del Ejército Británico, cuyos esfuerzos desembocaron en la creación del Escudo corporal Dayfield, el cual entró en servicio en 1916. Dicha prenda de protección se trataba de un chaleco de tejido de algodón con unas placas metálicas tanto en la parte frontal como en la trasera.
  - **Bando alemán:** Alemania desarrolló en 1916 el *sappenpanzer*, una armadura en forma de placas de níquel y silicona, la cual resultaba demasiado pesada para infantería y ello llevó crear su versión mejorada en 1918, el *Infanterie-Panzer*.

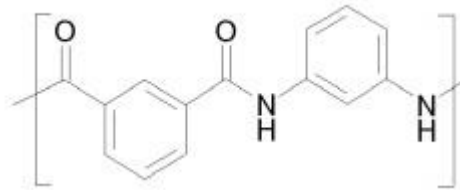
- **Bando americano:** el Brewster Body Shield se trataba de una coraza y un casco de acero al cromo-níquel, los cuales podían absorber el impacto de una bala de la ametralladora ligera Lewis a 820 m/s, la cual empleaba munición de calibres entre 7,7 y 7,92 mm.
  
- **Segunda guerra mundial:**
  - **Bando inglés:** En 1941, se desarrolló un blindaje hecho con placas de acero al manganeso; que estaba formado por dos placas que cubrían la zona frontal y una placa en la parte baja de la espalda, que protegía los riñones y otros órganos vitales. En 1943, se fabricó un chaleco diseñado para los pilotos de bombarderos, el cual estaba confeccionado a partir de tela de nylon y era capaz de detener munición antiaérea y metralla.
  
  - **Bando americano:** los chalecos de placas Doron son un laminado a base de fibra de vidrio, que se utilizaron por primera vez en la batalla de Okinawa en 1945
  
  - **Bando soviético:** 1942-SN42 Consistía en dos placas de acero prensado de 2 mm de espesor, que protegían la parte delantera del torso y la ingle. Era capaz de proteger contra balas de 9×19 mm disparadas por un MP40 a unos 100 metros de distancia.
  
- **Postguerra (Guerra de Corea, etc.)**
  - **Bando americano:** se desarrolló el modelo M-1951, que utilizaba segmentos de plástico reforzado con fibra o de aluminio tejidos en un chaleco de nailon.
  
  - En 1971, Stephanie Kwolek, química investigadora en DuPont, descubrió una solución de polímero cristalino líquido que llevó a la invención del Kevlar, y, a mediados de los años 70, DuPont presentó finalmente el producto al mercado.
  
  - En 1975, el fundador de American Body Armor, Richard A. Armellino, lanzó al mercado un chaleco fabricado en su totalidad con kevlar. El llamado K-15, compuesto por 15 capas de kevlar incluía también una "placa de trauma" de acero balístico de 5" × 8" colocada verticalmente sobre el corazón.

## I.3. Materiales recientes (1990 - actualidad)

En este apartado se expondrán los materiales modernos más influyentes o novedosos en el sector de la industria militar y de la protección personal.

### I.3.1. Kevlar

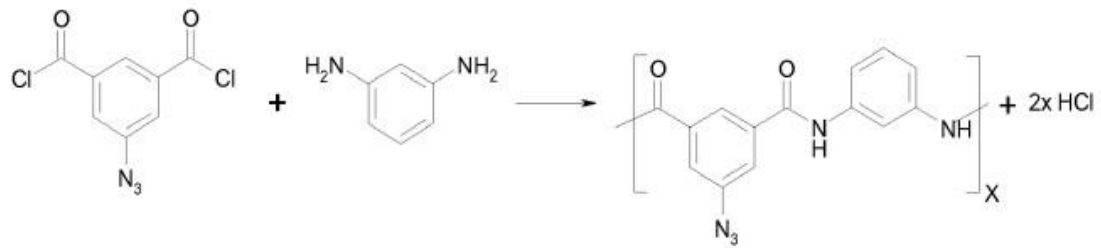
La marca registrada como Kevlar corresponde a la fibra sintética nombrada químicamente como poliparafenileno tereftalamida, que se corresponde con el conocido tejido de fibra de aramida, la cual forma parte de las poliamidas aromáticas[2].



*Ilustración 1. Fórmula química del Kevlar.*

El Kevlar tiene un gran comportamiento mecánico, es una fibra con una alta resistencia y rigidez. Para conseguir tales propiedades, las fibras suelen recibir un ensimaje para unirse entre sí, de esta forma no existen huecos entre ellas y se obtiene mayor resistencia.

La fabricación del polímero que compone la fibra de aramida consiste en la síntesis mediante la reacción por adición del compuesto m-fenilendiamina con el ácido isoftálico dicloruro, resultando como producto la aramida y, como subproducto, cloruro de hidrógeno, tal y cómo se observa en la Ilustración 1.



*Ilustración 2. Reacción química para la obtención del Kevlar.*

La producción de la fibra de aramida consiste en una extrusión del polímero de aramida juntando las fibras paralelamente en forma de hilos. Los hilos de filamento se preparan mediante chorro seco e hilado húmedo de una solución cristalina líquida de aramida en ácido sulfúrico concentrado. Después de la extrusión a través de orificios giratorios, los filamentos líquidos pasan a través de un espacio de aire y entran en un baño de coagulación que contiene agua. Los filamentos se lavan posteriormente, neutralizan, secan y se enrollan en bobinas.



*Ilustración 3. Maquinaria de hilado de Kevlar en formato tela.*

En la solución giratoria, las moléculas rígidas de aramida forman dominios cristalinos líquidos en los que las moléculas de polímero están bien alineadas. Durante el proceso de hilado en sí, el estiramiento elongacional de estos dominios en el espacio de aire induce que los dominios y la orientación de las moléculas de polímero se alineen con la dirección del flujo.

Con el polímero obtenemos una alta resistencia debido a las interacciones intermoleculares entre las cadenas adyacentes en forma de apilamiento molecular causado por los puentes de hidrógeno en los grupos carbonilo y amino (C-H, N-H). Además, se consigue una fuerza adicional derivada de las interacciones de apilamiento aromático entre las cadenas adyacentes. Es por la presencia de este tipo de interacciones en el Kevlar que conseguimos una gran resistencia, pues tienen una mayor influencia en el material que las interacciones de Van der Waals y la longitud de la cadena que suelen influir en las propiedades de otros polímeros y fibras sintéticas.

Para aplicaciones balísticas, se emplean los productos Kevlar 129, Kevlar 149 y Kevlar KM2.

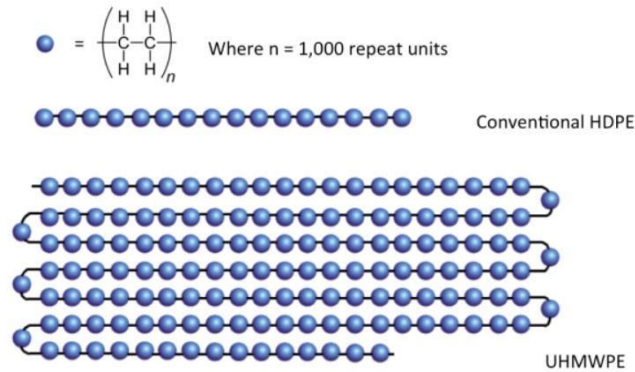
Los productores más importantes en la fabricación de la fibra de aramida para su aplicación en protecciones balísticas son Dupont, cuya marca registrada que tiene es Kevlar, entre otras; y Twaron.

### I.3.2. UHMWPE

El polietileno de peso molecular ultra alto (UHMWPE, UHMW) es un termoplástico, de la familia de las poliolefinas, que se obtiene en la síntesis del monómero de etileno utilizando un catalizador metalocénico en el proceso de extrusión por pistón. El UHMWPE se procesa de diversas formas: moldeo por compresión, extrusión por pistón, hilado de gel y sinterización.

Es un polímero con una cadena molecular muy larga (100.000 a 250.000 unidades de monómero por molécula, en comparación con los 700 a 1.800 monómeros del HDPE) por lo que su estructura molecular está más compactada y ofrece una mayor resistencia a impacto que las otras poliolefinas[3].

## Molecular Weight



*Ilustración 4. Estructura molecular del UHMWPE.*

En este polímero, las fuerzas de Van der Waals entre las moléculas son relativamente débiles debido a la baja polaridad del conjunto de la cadena, sin embargo, como las moléculas son muy largas, pueden existir numerosos solapamientos, lo que se traduce en la capacidad de transmitir mayores fuerzas de cizallamiento de molécula a molécula, además de permitir una mayor carga de tracción que si se tratase de unas fuerzas de interacción de Van der Waals de forma localizada.

El UHMWPE no contiene grupos funcionales (como ésteres, amidas o grupos hidroxílicos) que puedan interactuar con agentes externos (agua, humedad, productos químicos, radiación UV y los microorganismos), esto, sumado a su estructura característica del HDPE, pero con una cadena más larga y mayor compactación; confiere al UHMWPE una gran resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes orgánicos, además de una absorción de humedad extremadamente baja, resistencia a la abrasión y propiedades autolubricantes. Por esto último, la piel no interactúa mucho con dicho material, lo que hace que el contacto con la superficie de la fibra de UHMWPE sea cómoda y no genere irritaciones[4].

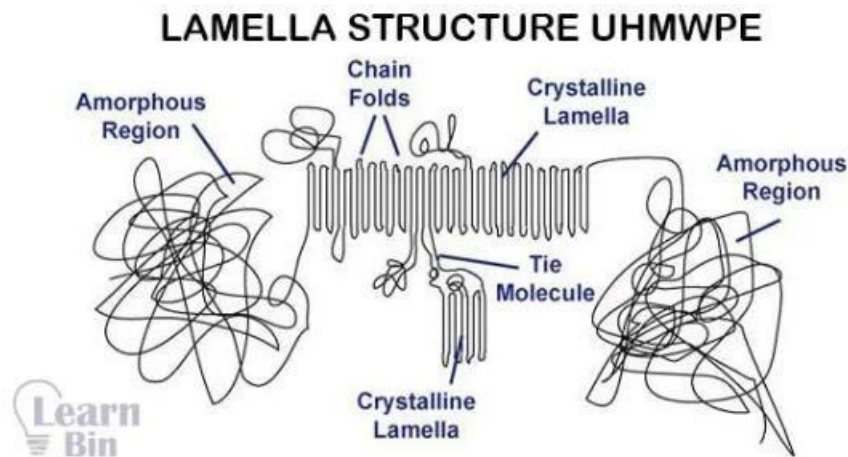
Por otro lado, mediante el conformado en fibras conseguimos que las cadenas de polímeros consigan una orientación paralela cercana al 95% y una cristalinidad de entre un 39% y un 75%.

En lo respectivo a las propiedades térmicas, el polietileno de ultra alto peso molecular no presenta una gran capacidad de resistencia térmica debido a la débil unión entre sus monómeros. Su punto de fusión es de unos 130 a 136 °C, y,

según el fabricante DSM, no es aconsejable utilizar las fibras de UHMWPE a temperaturas superiores a los 80 a 100 °C durante períodos prolongados. Por otro lado, a temperaturas bajo cero se vuelve quebradizo, sobre todo alcanzando valores inferiores a -150 °C.

Las cualidades de las fibras de UHMWPE fueron descubiertas por Albert Pennings en 1968. A principios de los años sesenta, se empezó a fabricar mediante moldeo por compresión. El proceso de hilado en gel llegó mucho más tarde y no fue hasta 1990 cuando DSM sacó al mercado productos comercialmente viables.

En la hilatura de gel se pretende estirar y termoendurecer la fibra para crear una estructura cristalina. Para ello, se extruye un gel de UHMWPE a una temperatura determinada con gran precisión a través de una hilera. El producto de la extrusión presenta un alto grado de orientación molecular debido a que es expulsado mediante aire y posteriormente enfriado en un baño de agua. Por lo tanto, la fibra resultante tendrá una gran resistencia a la tracción. La hilatura de gel es un proceso en el que la calidad del producto, en lo respectivo a las propiedades mecánicas, depende de la separación de las moléculas individuales de la cadena en el disolvente para que se produzcan, lo menos posible, los enredos intermoleculares, puesto que las moléculas se disponen en paralelo. Dichos enredos dificultan la correcta orientación de las cadenas, reduciendo así la resistencia final del producto. Ver Ilustración 5.



*Ilustración 5. Diversas morfologías en la estructura molecular del UHMWPE.*

Tal y como se aprecia en la Ilustración 5, se pueden encontrar diversas morfologías a lo largo de la cadena de UHMWPE que influyen en la resistencia



del material. De todas ellas, las regiones amorfas son las más críticas pues su ordenación molecular es totalmente caótica, seguidas de los enredos en la molécula, que se distinguen por regiones que se separan de la cadena, pudiendo formar una región amorfa o una región de lámina cristalina, y posteriormente se vuelven a unir a la cadena.

Dos de las denominaciones comerciales más conocidas de geles ligeros de fibras orientadas hiladas de alta resistencia (UHMWPE hilado en gel) son Dyneema y Spectra. Algunos de los productos fabricados bajo dichas marcas pueden llegar a tener un límite elástico de hasta 2,4 GPa (siendo comparable al de los aceros de alta resistencia y muy superior al de los aceros de bajo carbono) y una densidad de 0,97 g/cm<sup>3</sup> (en el caso del Dyneema SK75)[5]. Estas dos propiedades hacen del UHMWPE un material con un ratio resistencia-peso ocho veces superior a la de los aceros de alta resistencia. A su vez, a modo de comparación con materiales de aplicaciones similares, la relación resistencia-peso del UHMWPE es aproximadamente un 40% mayor que la de la aramida.



*Ilustración 6. Logotipos de Dyneema y Spectra.*

En aplicaciones de defensa, y particularmente para el blindaje personal, las fibras de polietileno de alto módulo se alinean y se unen en láminas. Mediante la superposición de dichas láminas orientando las fibras en varios ángulos, se obtiene un material compuesto con resistencia en todas las direcciones[6].

### I.3.3. Zylon

El Zylon es un material polimérico sintético desarrollado por SRI International en 1980, cuya fórmula química es el poli(p-fenileno-2,6-benzobisoxazol).

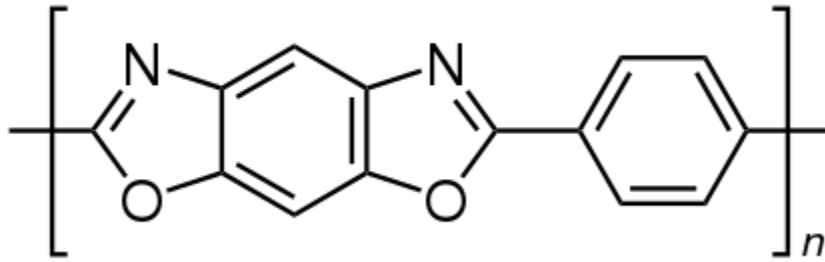


Ilustración 7. Fórmula química del Zylon.

El zylon se utilizó ampliamente en la protección personal de la policía estadounidense en 1998, cuando Second Chance Body Armor, Inc. lo introdujo en sus chalecos de protección "Ultima" y "Ultimax". Tras ponerse en duda la efectividad de los chalecos en 2003, se llevaron a cabo varios estudios que informaban de la posible degradación de los chalecos de Zylon al cabo de un tiempo. En 2005, el Instituto Nacional de Justicia de Estados Unidos retiró la certificación del Zylon en los chalecos antibalas de uso policial.

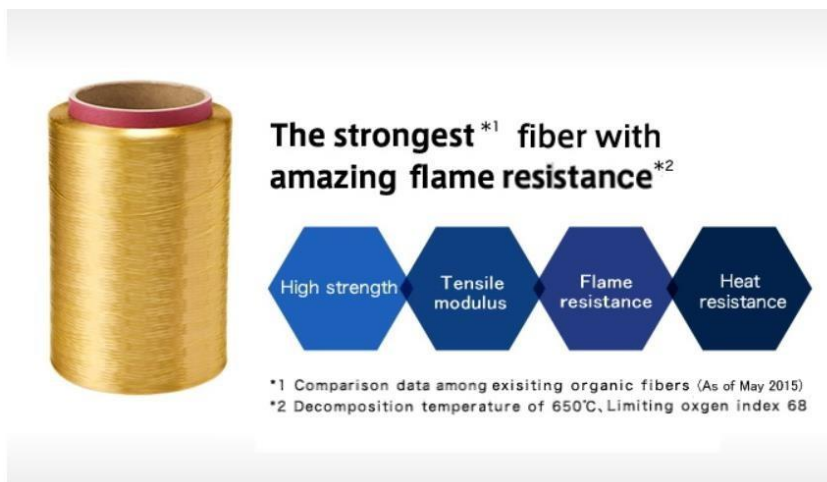


Ilustración 8. Bobina de Zylon con publicidad de Toyobo Global.

### 1.3.4. Dragon Skin

Se trata de chaleco balístico flexible con una configuración de armadura de escamas que permite un buen rango de movimiento y está ideado para soportar un elevado número de disparos en comparación con otros blindajes militares. Fue diseñado por Pinnacle Armor y está compuesto por una serie superpuesta

de discos cerámicos, compuestos por matrices y laminados cerámicos de carburo de silicio, de alta resistencia a la tracción, recubiertos con un tejido de fibra de vidrio.



*Ilustración 9. Radiografía junto con imagen del chaleco Dragon Skin.*

Uno de los productos que utiliza esta tecnología, Dragon Skin Extreme, proporcionaba un nivel III de protección, generada por los discos superpuestos de dimensiones  $6,4 \text{ mm} \times 51 \text{ mm}$ , a lo largo de un área de  $250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ . El peso del blindaje Dragon Skin Extreme era de aproximadamente  $2,9 \text{ kg}$ .

A pesar de que la fabricación de Dragon Skin tuvo lugar entre 2006 y 2007, ya en agosto de 2007 el NIJ retiró la certificación de protección nivel III. Este hecho tuvo lugar tras la realización de determinadas pruebas a manos del Ejército de los Estados Unidos para comparar su rendimiento frente al presente blindaje corporal Interceptor[7].

Los resultados de las pruebas concluyeron que el adhesivo (pegamento epoxi) que mantenía unidas las placas de los discos se deshacía cuando era sometido a altas temperaturas, dando lugar al desprendimiento de los discos y su acumulación en la parte inferior del panel del blindaje. Esto dejaba desprovisto al usuario de blindaje en partes importantes, por lo que no se podía garantizar que el chaleco mantuviese su rendimiento balístico durante su período de garantía declarado de seis años.

## I.4. Configuraciones de chalecos usados en la actualidad

Tal y como se ha visto en los apartados I.2 y I.3, las prendas de protección balística han evolucionado enormemente durante el último siglo. En este apartado se analizarán las configuraciones de blindaje usadas durante las últimas dos décadas a modo de referencia para el posterior análisis que se llevará a cabo en este Trabajo de Final de Grado.

Todo el equipamiento que a continuación será analizado es de uso militar y de diseño y fabricación estadounidense, puesto que la industria militar americana es de las más avanzadas e influyentes en Europa, siendo los EE. UU. el mayor exportador de este tipo de productos.

### I.4.1. Protección balística hasta el 2000.

En el rango temporal analizado, distinguimos en sus inicios un predominio por el uso de únicamente de Kevlar (1980 en adelante), al que después seguirá una tendencia de uso de refuerzos balísticos para mejorar la capacidad de protección de los chalecos.

#### I.4.1.1. PASGT

El Personnel Armor System for Ground Troops fue una configuración de blindaje empleado desde 1980 hasta mediados de los años 2000.

Está formado por un casco de combate y un chaleco balístico. El casco estaba fabricado con 19 capas de Kevlar, lo cual tenía una masa de entre 1,3 y 1,9 kg; mientras que el chaleco estaba fabricado con 13 capas de Kevlar, teniendo una masa de 4 kg.



*Ilustración 10. Soldado vistiendo el chaleco y el casco de Kevlar de su PASGT.*

Ambas piezas del PASGT ofrecían protección contra metralla y munición de armas pequeñas. A modo de referencia con lo que se explicará posteriormente en el apartado A.1., el grado de protección que ofrecería el PASGT según la normativa NIJ Standard 0101.06 sería de nivel II o IIA, certificaciones que garantizan protección contra municiones de 9 mm o de revolver.

### I.4.1.2. RBA

El Ranger Body Armor fue una configuración de protección usada desde 1990 hasta mediados de los 2000.

Por una parte, está formado por unos paneles flexibles con un relleno de aramida (13 capas de Kevlar KM2) recubierto en un soporte de nylon, y una o dos placas rígidas cerámicas de óxido de aluminio de área 50x50 mm. La masa del equipamiento, sin tener en cuenta las placas cerámicas, es de 3,6 kg. Cuando se colocan ambas placas se consigue un área protegida de 250x300 mm y una masa total equivalente a 11,4 kg.



Ilustración 11. Imagen de las placas cerámicas, a), junto con un soldado vistiendo el equipamiento RBA, b).

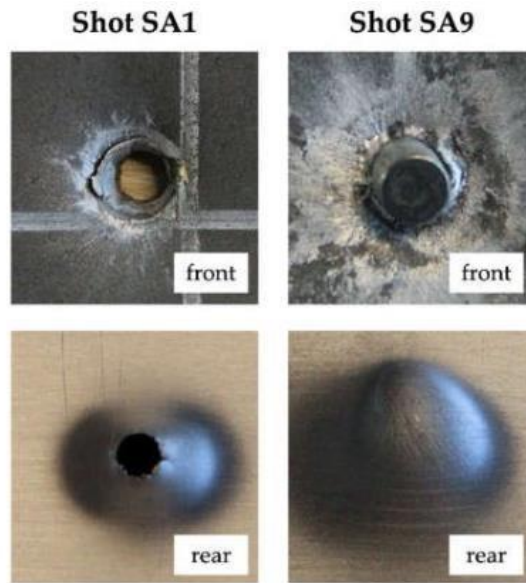
La protección ofrecida por los paneles flexibles es solo contra fragmentación y munición de pistola, mientras que, si se le añaden las placas cerámicas, ofrece protección contra munición de camisa metálica de 5,56×45 mm de la OTAN y 7,62×51 mm de la OTAN. Según la NIJ Standard 0101.06, esto equivaldría a un grado de protección III.

## 1.4.2. Refuerzos balísticos

Tras la observación del rendimiento obtenido con la configuración RBA, la cual permitía obtener un grado superior en la escala de certificación NIJ al agregar placas cerámicas de refuerzo al chaleco de Kevlar, se empezó investigar e implementar el uso de refuerzos rígidos en los chalecos antibalas.

A dichos refuerzos se les conoce como placas balísticas y se añaden a los chalecos balísticos para conseguir protección contra munición de mayor calibre o más penetrante. El principio de funcionamiento radica en la absorción y disipación de la energía cinética del proyectil, que, en el caso de las placas cerámicas, se traduce en la rotura local de la placa y el embotamiento del material de la bala en la placa (deformación plástica de la bala).

En la Ilustración 12 se muestra una imagen de dos impactos de bala sobre una superficie rígida. Se puede apreciar en la vista frontal de la sección “Shot SA9” el embotamiento del material de la bala, puesto que, observando las imágenes de la parte posterior, se aprecia que no ha habido penetración, por lo que la bala ha quedado totalmente deformada y atrapada en el orificio frontal.



*Ilustración 12. Imagen del impacto de dos balas desde las perspectivas frontal y trasera.[8]*

Posteriormente a la comercialización del tejido de UHMWPE para aplicaciones balísticas (Spectra o Dyneema), se investigó e implementó la adición de un forraje trasero de Spectra a la placa balística, el cual distribuye la energía del impacto a una zona más amplia y detiene los fragmentos, reduciendo la probabilidad de que el portador sufra lesiones mortales si la bala quiebra la placa cerámica.

El tipo de material usado en los refuerzos balísticos puede ser variado. En los últimos años ha sido más frecuente el uso de placas cerámicas, sin embargo, en este Trabajo de Final de Grado se ha optado por investigar también en el uso de aceros. Por otra parte, se conoce que ha habido también investigaciones alrededor de metales de altas prestaciones como el titanio y otras superaleaciones, sin embargo, no se ha considerado incluir esta rama de investigación en la selección de materiales.

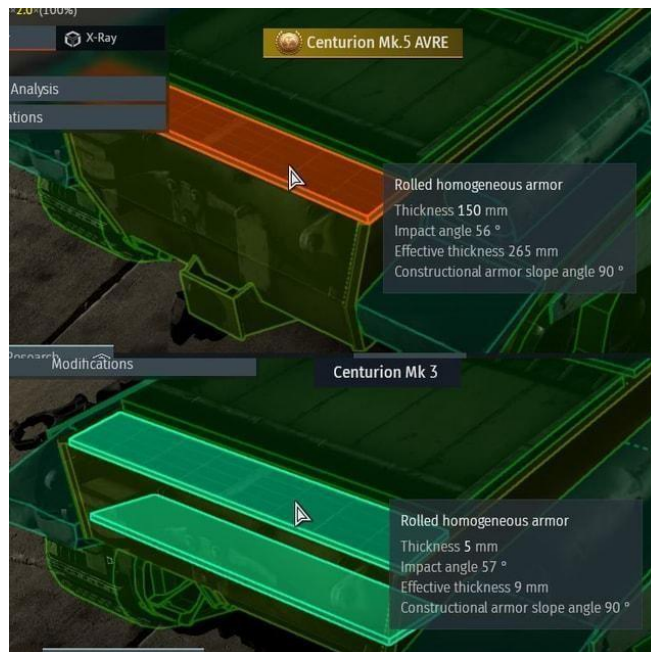
#### 1.4.2.1. Placas metálicas

Entre los blindajes metálicos se diferencian los siguientes tipos:

- RHA (Rolled Homogeneous Armor): El acero de blindajes tradicional o blindaje laminado homogéneo tiene una dureza Brinell de entre 250 y 410. A bajos espesores de placa su capacidad para detener la

penetración de las balas de alta velocidad es insuficiente, por lo que se emplea principalmente en el blindaje de vehículos, cámaras de seguridad y puertas blindadas, usos en los que se permite emplear chapas de mayor grosor.

Tal y cómo se muestra en la Ilustración 13, extraída del videojuego de simulación de combate, War Thunder; es habitual encontrar blindaje laminado homogéneo en vehículos de combate pesados, puesto que es un material que no ofrece suficiente protección balística a bajos espesores de placa, hecho que no se da en un vehículo de combate, el cual se puede permitir el uso de materiales menos resistentes, pero en mayor cantidad.



*Ilustración 13. Ejemplo de un vehículo de combate con blindaje RHA en el videojuego War Thunder.*

Encontramos dos ejemplos de productos comercializados bajo esta clasificación en dos importantes fabricantes: los aceros Armox 370T Clase 1 y Clase 2 de SSAB, y los aceros MARS 280 y MARS 380 de Industeel, perteneciente a ArcelorMittal.



Tabla 1. Propiedades de los aceros RHA seleccionados.

Designación	Espesor (mm)	Límite elástico (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Dureza (HBW)
Armox 370T Clase 1	3-100	850-1000	950-1350	300-430
Armox 370T Clase 2	3-100	800	900-1100	280-330
MARS 280	5-50,8			260-310
MARS 380	5-305	1000	1150	210-410

- HHA (High Hardness Armor): el acero de alta dureza para blindajes presenta una dureza Brinell de alrededor de 500. Este material presenta unas propiedades que lo hace capaz de soportar el impacto de munición antiblindaje (AP y APDS).

Tal y como se observa en Ilustración 14, el blindaje HHA tiene un uso más recurrente en los vehículos de combate pesados más modernos, puesto que tiene unas propiedades que ofrecen protección contra proyectiles pesados perforantes.



Ilustración 14. Ejemplo de un vehículo de combate con blindaje HHA en el videojuego War Thunder.

Para los aceros HHA encontramos tres ejemplos: Armox 500T y Armox 520T de SSAB, y MARS 500 de ArcelorMittal.

*Tabla 2. Propiedades de los aceros HHA seleccionados.*

Designación	Espesor (mm)	Límite elástico (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Dureza (HBW)
Armox 500T	3-80	1250	1450-1750	480-540
Armox 520T	4-12	1225	1500-1850	500-550
MARS 500	4-50,8	1250	1700	477-534

- DHA (Dual Hardness Armor): los aceros DHA son fabricados por laminación de placas de dureza alta (601-712 BHN) con placas de menor dureza (534-641 BHN) para conseguir la unión de ambos y obtener una gran resistencia en su cara frontal y mayor ductilidad en la cara posterior. Debido a su complicada fabricación, su uso no se ha extendido.
- UHHA (Ultra High Hardness Armor): los aceros para blindajes de ultra alta dureza normalmente presentan valores de dureza superiores a 600 HRB o su equivalencia en Rockwell C, 57.3. Las altas prestaciones de este material le permiten detener municiones perforantes de calibres 7.62 y 12.7 a bajos espesores de placa. Para esta categoría encontramos hasta 4 denominaciones comerciales: Armox 600 y Armox Advance de SSAB y MARS 600 y MARS 650 de ArcelorMittal.

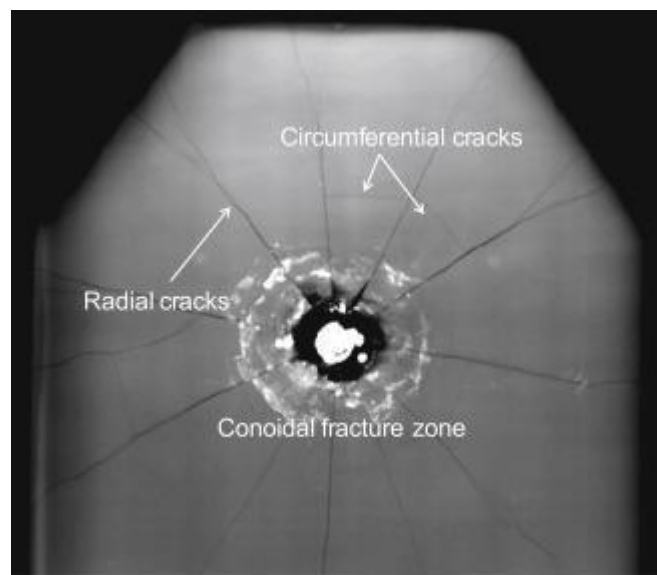
*Tabla 3. Propiedades de los aceros UHHA seleccionados.*

Designación	Espesor (mm)	Límite elástico (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Dureza
Armox 600T	4-20			570-640 HBW
Armox Advance	4-7,9			58-63 HRC (600-710 HBW)[9]
MARS 600	5-50,8	1450	2150	577-655 HBW
MARS 650	4-16			650 HBW

## I.4.2.2. Placas cerámicas

Por lo general, las placas cerámicas son menos resistentes ante impactos múltiples de bala que los aceros o el titanio. Esto se debe a la naturaleza quebradiza de este tipo de materiales, pues son susceptibles ante los impactos de bala concentrados en un área pequeña, ya que se produce una concentración de tensiones en la placa y hacen añicos la sección de la placa a la que apuntan[10].

En la actualidad, existen soluciones, como la tecnología IMP/ACT diseñada por Ceradyne, que hacen uso de supresores de grietas de acero inoxidable, o el supresor de titanio implementado en los últimos refuerzos balísticos GRANIT GOST 6A utilizados por las Fuerzas Armadas de Rusia.



*Ilustración 15. Fractura en una placa de armadura cerámica tras un impacto de bala.*



*Ilustración 16. Interior de una placa cerámica 6B45 "Granit" Gost 5A/6A.[11]*

Tal y como se aprecia en la Ilustración 16 en comparación con la Ilustración 15, la tecnología de supresión de grietas del blindaje Granit permite que la mayor parte de la placa quede totalmente intacta y no vea sus capacidades de protección reducidas, a diferencia de la armadura cerámica convencional de la Ilustración 15, la cual presenta grandes fracturas a lo largo de la cara frontal.

Ejemplos de placas cerámicas empleadas por el Ejército de los Estados Unidos:

- SAPI (Small Arms Protective Insert): Están hechas de carburo de boro o carburo de silicio. Pueden presentar unas dimensiones desde 184 x 292 mm (con una masa de 1,27 kg) hasta 280 x 356 mm (con una masa de 2,4 kg). El modelo SAPI resiste hasta tres impactos de bala de calibre 7,62x51 mm de la OTAN M80 a una velocidad de salida de hasta 840 m/s.



Ilustración 17. Imagen de un SAPI tamaño L desde las perspectivas frontal y trasera.

- ESAPI: (Enhanced Small Arms Protective Insert): Al igual que las SAPI, también están fabricadas con carburo de boro. Pueden presentar unas dimensiones desde 184 x 292 mm (con una masa de 1,70 kg) hasta 280 x 356 mm (con una masa de 3,25 kg). Este modelo puede sobrevivir a tres impactos de munición antiblindaje (AP) .30-06 Springfield M2 ("black-tip armor-piercing").

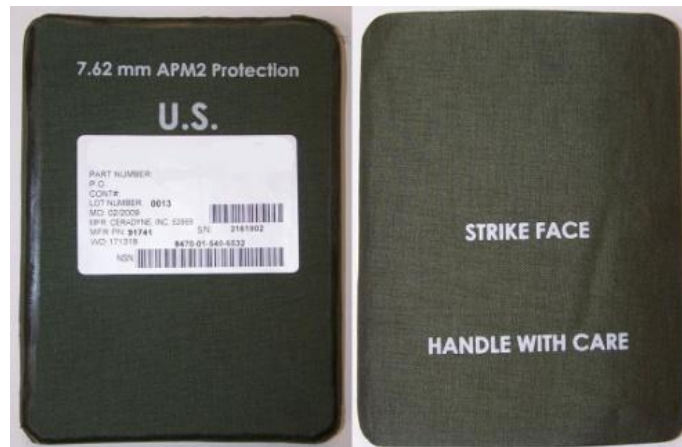


Ilustración 18. Imagen de un ESAPI desde las perspectivas frontal y trasera.

- ESBI (Enhanced Side Ballistic Insert): Están fabricadas a base de carburo de boro, pero, además incluyen una capa de UHMWPE. Suelen presentar unas dimensiones de 150 x 200 mm y una masa de 1kg. Tiene la misma capacidad de protección que el modelo ESAPI.



Ilustración 19. Imagen de un ESBI desde las perspectivas frontal y trasera.

- XSAPI: (X-threat Small Arms Protective Insert): Se fabrican con carburo de boro o carburo de silicio y una capa de Spectra (UHMWPE), la cual se encarga de atrapar cualquier fragmento de la placa o de la bala que consiga salir proyectado de la placa, evitando así que hiera al portador. Tiene una capacidad de supervivencia de hasta tres impactos de munición antiblindaje M993 7.62x51 de la OTAN.

### 1.4.3. Protección balística desde el 2000 hasta la actualidad

Con el desarrollo e implementación de los refuerzos balísticos, se ha conseguido en las últimas 2 décadas salvar el vacío en cuanto a protección que existía ante las ya existentes municiones de gran calibre y perforantes, dado que el tan frecuentemente usado Kevlar no permite una capacidad de protección tan alta.

En este periodo analizado se aprecia una tendencia de crear un blindaje más pesado mediante la adición de una mayor cantidad de placas balísticas o de refuerzos de mayor calidad. De esta forma se pretendía cubrir una mayor área del cuerpo humano para minimizar las bajas.

#### 1.4.3.1. IBA

El Interceptor Body Armor, siendo usado en servicio del 2000 hasta 2015, presenta una masa total de 15 kg y está formado por:

- Outer Tactical Vest (OTV), que consiste en una carcasa portadora de fibra Kevlar KM2, y tres insertos balísticos principales (paneles

laterales izquierdo y derecho, y un panel trasero). Adicionalmente, puede llevar un protector de garganta, un protector de ingle y un protector de bíceps (o deltoides). Estos tres últimos protectores auxiliares son extraíbles del chaleco principal. El OTV ofrece una protección similar al PASGT.

- 2 placas SAPI, gracias a las cuales, se consigue una protección de nivel III en aquellas zonas que cubren.



Ilustración 20. Esquema del equipamiento IBA desglosado, siendo usado por un soldado.

### 1.4.3.2. IOTV

El Improved Outer Tactical Vest, siendo usado desde el 2007 hasta la actualidad, presenta una masa de 14 kg en total. Gracias a su diseño modular, se consigue una mayor flexibilidad táctica, lo que implica un buen equilibrio entre protección balística y agilidad del soldado, evitando disminuir las capacidades físicas y la movilidad. Se compone de:

- El Improved Outer Tactical Vest (IOTV), es una versión mejorada y un reemplazo del OTV. Es compatible con los componentes DAPS (Deltoid and Axillary Protector System), ESAPI (Enhanced Small Arms Protective Insert), Enhanced Side Ballistic Inserts (ESBI), así como con el protector inguinal del OTV. Sin los refuerzos balísticos, tiene una masa de 1,6 kg y proporciona protección contra munición

de 9 mm y fragmentación. El laminado de Kevlar está preparado para detener balas de 9 mm con camisa metálica de 8 gramos de masa a 426 m/s con una deformación mínima y tiene un V-50 de aproximadamente 465 m/s. Esto significa que la bala tiene que viajar a más de 465 m/s para tener más de un 50% de posibilidades de atravesar el panel de Kevlar.

- 2 placas ESAPI (frontal y trasera) y 2 placas laterales ESBI, gracias a las cuales, se consigue una protección de nivel IV en aquellas zonas que cubren.



*Ilustración 21. Esquema del equipamiento IOTV desglosado, siendo usado por un soldado*



## II. Objetivos

### Objetivos

### II.1. Objetivos generales

En este apartado se recogen los principales objetivos que persigue este TFG y le otorgan un sentido a todo el desarrollo realizado que se demostrará a lo largo de esta Memoria.

Los objetivos generales son:

1. Comparación de rendimiento bajo ensayo de impacto balístico entre dos materiales usados en la actualidad, Kevlar y UHMWPE, para su aplicación en prendas de protección balística.
2. Comprobación de las supuestas prestaciones mejoradas del UHMWPE para su empleo en protección personal, en comparación al Kevlar, según la publicidad de los fabricantes como DSM y la proposición de una alternativa en el caso de no obtener resultados mejorados.

### II.2. Objetivos particulares

En este apartado se recogen los objetivos parciales que se pretenden alcanzar con el fin de conseguir el cumplir los objetivos generales.

Los objetivos particulares son:

1. Diseño de una prenda de protección balística con todos los componentes necesarios para su empleo en combate según los productos existentes en el mercado.
2. Selección de materiales y su caracterización para el modelo de simulación.
3. Creación de un modelo de simulación dinámico.
4. Estudio de deformaciones para la aplicación de la normativa de seguridad que proceda.
5. Rediseño del chaleco antibalas
6. Estudio de las alternativas para la fabricación del diseño
7. Estudio de la viabilidad económica del proyecto de fabricación y comercialización del diseño.

## III. Desarrollo del proyecto

# Desarrollo del proyecto

### III.1. Resumen del apartado A.1. Normativa aplicable

En el anexo A.1. se ha realizado una revisión y exposición detallada de la normativa que regula la realización de ensayos balísticos para la certificación de los niveles de seguridad para los blindajes corporales, por lo que este apartado resumirá los aspectos más importantes presentes en el anexo.

La normativa empleada es la NIJ-0101.06 y comprende la realización de un amplio muestreo de chalecos (nombrado blindaje flexible, es decir, el laminado de fibra en cuanto a términos mencionados en este TFG) y de placas de refuerzo (nombrado blindaje rígido), si procede; para su empleo en distintos ensayos de laboratorio.

La certificación de seguridad requiere el empleo unos tipos concretos de munición y un muestreo de blindajes en unas cantidades definidas. Según el nivel de seguridad, de los lotes de blindajes se reparten las unidades para aplicarles un acondicionamiento a una parte de ellas, mientras que las otras se reservan para su ensayo sin haber sido acondicionadas. El acondicionamiento varía según si se trata de un blindaje flexible o rígido, pero se trata de un proceso por el que se somete a distintos ensayos de desgaste físico, térmico, etc...A grandes rasgos, prácticamente cada mitad del lote de blindajes se destina a las pruebas de rendimiento balístico que se comentarán a continuación.

Una vez se han realizado todos los ensayos de acondicionamiento y respetando los tiempos de ejecución de los procesos, lo siguiente es realizar los ensayos de P-BFS (Perforación-Deformación de la Cara Posterior) y BL (Límite Balístico). En el primero se trata de someter cada blindaje a múltiples impactos de bala, manteniendo constante la velocidad del proyectil, y medir la deformación de la capa de blindaje que se encuentra en contacto con el portador; mientras que, en el segundo, se trata de someter cada blindaje a múltiples impactos de bala que se realizan variando la velocidad del proyectil en función de los resultados (penetración o parada), con los cuales se emplea una fórmula estadística que permite establecer la velocidad máxima de un proyectil a partir de la cual un blindaje concreto tiene una probabilidad media de pararlo.

En lo que concierne al proyecto, en nivel de seguridad que se ha propuesto comprobar es el NIJ III, que emplea munición de calibre 7,62x51 OTAN M80 FMJ.

## III.2. Resumen del apartado A.2. Diseño

En el anexo A.2. se ha realizado una exposición detallada del proceso de diseño mediante el software SolidWorks 2020, por lo que este apartado resumirá los aspectos más importantes presentes en el anexo.

El diseño ha tomado dos caminos principales; por una parte, se han creado, de la forma más realista posible, los componentes que intervienen en los ensayos de impacto balístico; y, por la otra parte, se han creado otros bocetos a modo de versiones simplificadas de los componentes con geometrías realistas, los cuales han sido empleados posteriormente en el modelo de simulación FEM. La creación de diseños simplificados se ha materializado en el momento que, tras semanas de intentos fallidos de crear un modelo dinámico robusto con las geometrías realistas, se llegó a la conclusión que los cálculos que realizaba el sistema resultaban muy complejos y la configuración del modelo no era la adecuada, por lo que se requería de alguna simplificación para solucionar el problema. De esta forma, el camino del diseño de bocetos simplificados llevó a la creación de tres diseños distintos empleados en distintos tipos de simulaciones que pretendían dar solución al problema mencionado (modelo dinámico con materiales ortotrópicos, modelo dinámico con materiales isotrópicos y modelo estático).

De forma común a ambos caminos tomados, han participado las piezas de la munición (calibre 7,62x51 OTAN M80, FMJ), el blindaje rígido (placa de refuerzo, modelo de tipo SAPI) y el blindaje flexible (laminado de fibra).



### III.3. Selección de materiales

El objetivo de este apartado es el de exponer detalladamente los materiales que se han tomado en consideración investigar para su uso en la simulación FEM. Se comentarán los motivos por los que han sido seleccionados o rechazados, según proceda, y se mostrarán datos de sus propiedades mecánicas.

En primer lugar, para entrar en contexto, cabe destacar que el criterio de selección se ha basado en la máxima representación de la realidad. Se pretende tomar como referencia una configuración de blindaje ya existente y contraponerse con una configuración más novedosa y mejorada en algún aspecto que pueda beneficiar su uso en combate.

Así mismo, la búsqueda de materiales comprenderá 3 áreas principales: los materiales para la munición, los del blindaje flexible y los del blindaje rígido. La base de datos de la que se ha extraído la mayor parte de la información es el software Granta EduPack 2021 R2.

La recopilación de datos, tal y como se justificará en el apartado A.4., finalmente ha tratado de realizar una búsqueda con tal de poder simular modelos isotrópicos para todos los materiales.

#### III.3.1. Materiales empleados en la munición

Tal y como se mostrará en el apartado A.2., la munición empleada en el ensayo, la de calibre 7.62 x 51 OTAN, presenta un núcleo sólido y un revestimiento exterior. En el núcleo se suelen emplear metales densos por lo general, mientras que metales duros y rígidos en munición perforante. Para el recubrimiento se suelen usar metales blandos.

Tras el proceso de selección, los materiales escogidos según su aplicación son los siguientes:

- **Núcleo:** la selección del material para esta categoría se ha realizado atendiendo a los conocimientos previos básicos del autor en materia militar, que vienen justificados también por A.G. Kolmakov et. al.[12]; además de los datos del software Granta EduPack, en el que encontramos el plomo comercial puro (con pequeñas trazas de otros elementos) bajo la denominación UNS L50042, que típicamente se usa en municiones.

- **Revestimiento:** al igual que en la categoría anterior, la selección del material para este caso se ha realizado atendiendo a los conocimientos previos básicos del autor en materia militar, que vienen justificados también por A.G. Kolmakov et. al.; además de los datos del software Granta EduPack, en el que encontramos el latón bajo denominación ISO CuZn5, empleado típicamente en municiones.

### III.3.2. Materiales empleados en el blindaje flexible

Para el blindaje flexible se ha propuesto escoger dos materiales para su análisis en la simulación. Por una parte, se plantea comprobar la efectividad de un material usado habitualmente en la fabricación de protección balística. Por otra parte, se plantea comparar el desempeño de un material más novedoso con el fin de analizar una alternativa a lo que se ha estado usando hasta ahora.

Los materiales que se han tomado en consideración son el Kevlar y el tejido Dyneema de UHMWPE

- **Kevlar:** el Kevlar, tomándolo como referencia a modo de material usado con frecuencia en las últimas dos décadas y hasta la actualidad, será analizado para comprobar su comportamiento ante impactos de balas con tal de justificar su conocido uso comercial en la protección balística personal.

Los datos han sido extraídos de Granta y se ha escogido la denominación Kevlar 149, la cual es una variante que está pensada para aplicaciones de altas prestaciones, siendo la más resistente entre los productos bajo la marca Kevlar.

- **Dyneema:** la marca Dyneema se plantea como una alternativa novedosa para su uso en protección balística personal. El producto fabricado a partir de polietileno de ultra alto peso molecular se anuncia como un material con ciertas propiedades comparables a la del acero, de una gran ligereza y resistencia. Esto ha motivado la selección del material con tal de poder comprobar si el marketing sobre esta marca hace justicia a la realidad y si, por tanto, supone una alternativa factible para la sustitución del ya afianzado uso del Kevlar en chalecos antibalas.



Los datos sobre las propiedades de Dyneema, u otro tejido similar de UHMWPE para aplicaciones balísticas, han sido extraídos del artículo de Zhiwei Shen et al. A modo de simplificación, ya que la simulación se ha decidido realizarla con modelos isotrópicos y el artículo presenta datos de propiedades para un modelo ortotrópico, es decir, en las tres direcciones de los ejes (vector) y no en módulo, se han tomado los valores más favorables para el modelo, es decir, los valores máximos para cada categoría, excepto en el coeficiente de Poisson, que se ha tomado el valor mínimo.

### III.3.3. Materiales empleados en el blindaje rígido

Al igual que se ha expuesto en el apartado III.3.2, para el blindaje rígido también se plantea analizar un material usado hasta la actualidad y contraponer su rendimiento al de un material más novedoso. En este caso, la búsqueda del material alternativo se ha centrado en los aceros de aplicaciones militares, mientras que el material cuyo uso es conocido será el Carburo de Boro, el cual ya se ha introducido en el apartado I.4.2.2.

- Inserto balístico de acero: para la simulación del acero se ha considerado interesante tomar datos relativos a otros aceros comerciales de uso militar. Tal y como se ha expuesto en el apartado I.4.2.1., existen diversas denominaciones comerciales de las empresas SSAB e Industeel. Finalmente, se ha considerado el Armox Advance de SSAB por presentar la mayor dureza HBW.

Dado que el fabricante no ofrece todas las propiedades mecánicas y físicas necesarias para configurar el material en el software de simulación, se ha realizado una selección de materiales en el software Granta EduPack 2021 atendiendo a la composición química del Armox Advance y el rango de dureza Vickers (640-780 HV).

# Memoria

## Composición química (análisis de colada)

C <sup>*)</sup> (max %)	Si <sup>*)</sup> (max %)	Mn <sup>*)</sup> (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr <sup>*)</sup> (max %)	Ni <sup>*)</sup> (max %)	Mo <sup>*)</sup> (max %)	B <sup>*)</sup> (max %)
0.47	0.7	1.0	0.010	0.003	1.5	3.0	0.7	0.005

## Propiedades mecánicas

Espesor (mm)	Dureza (HRC)
4.0 - 7.9	58 - 63

Ilustración 22. Composición química y propiedades mecánicas del acero Armox Advance

El espesor hace referencia al rango de espesores de las placas que puede proveer el fabricante.

Posteriormente, para descartar resultados y obtener un único material, se ha comparado atendiendo a la densidad, el precio por kilogramo, la tenacidad y la dureza Vickers.

En la primera etapa, densidad vs precio/kg, se ha descartado el acero AISI S1 por ser el más caro.

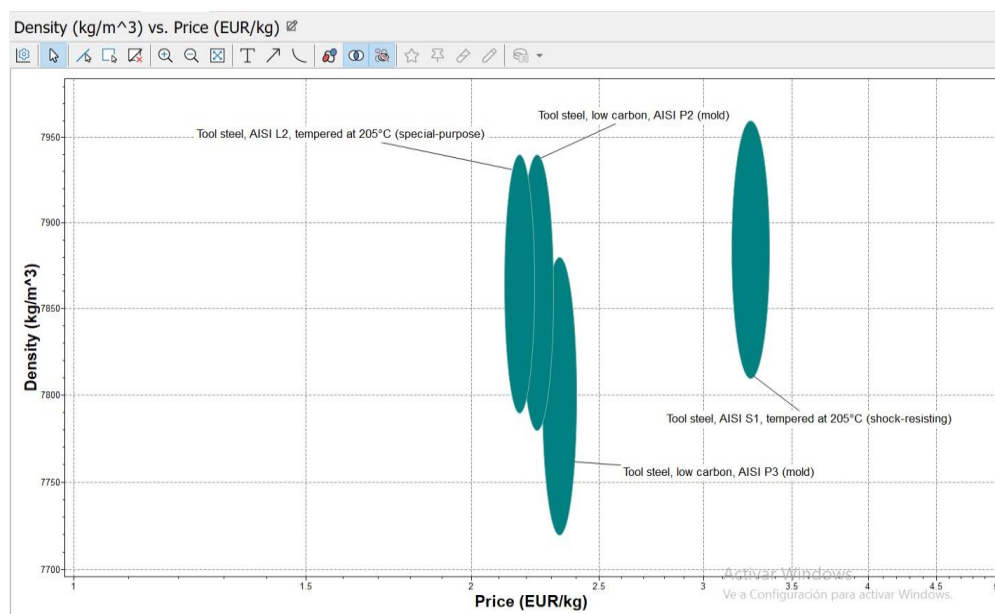


Ilustración 23. Primera etapa de la selección del acero. Gráfica de Densidad vs Precio por unidad de masa

En la segunda etapa, se ha tomado finalmente el acero AISI L2 por presentar la mayor tenacidad entre los materiales y, como se observa en la primera etapa, el menor precio entre todos ellos.

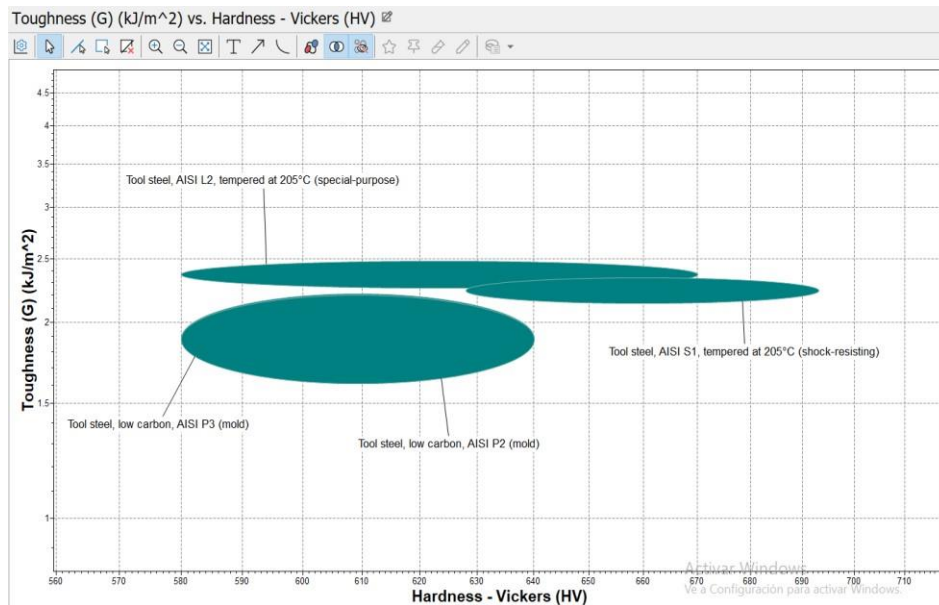


Ilustración 24. Segunda etapa de la selección del acero. Gráfica de Tenacidad vs Dureza Vickers

- Inserto balístico de Carburo de Boro: para esta categoría existen 3 registros de material con distintas propiedades, cuya diferencia radica en la forma de procesar el material, dando lugar a distintos comportamientos mecánicos.

Como el material es el mismo, el precio por unidad de masa no ofrece ninguna posibilidad de segregación, por lo que se han tenido en cuenta como criterios de valoración la tenacidad, la densidad, la dureza Vickers y la tensión a compresión.

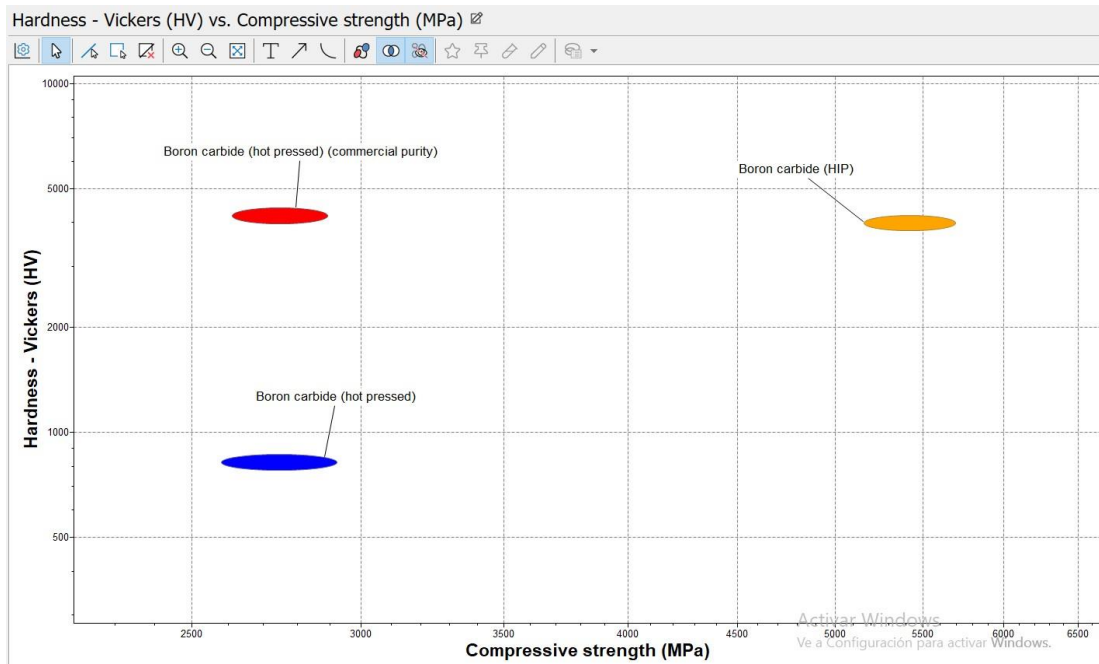


Ilustración 25. Primera etapa de la selección del carburo de boro. Gráfica de Dureza Vickers vs Tensión a Compresión

En la primera etapa, dureza Vickers vs tensión a compresión, se ha descartado el carburo de boro prensado en caliente, por ser el menos duro y tener la menor resistencia a compresión.

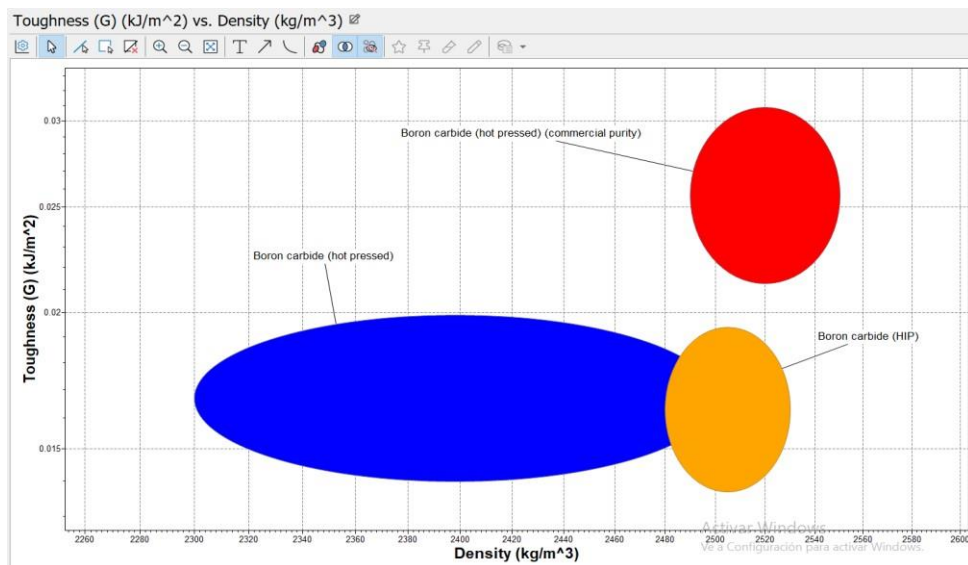


Ilustración 26. Segunda etapa de la selección del carburo de boro. Gráfica de Tenacidad vs Densidad

Finalmente, en la segunda etapa, dado que no existe una diferencia muy importante en cuanto a densidad y tenacidad, entre el carburo boro de pureza comercial y el fabricado por prensado isostático en caliente (HIP), se ha escogido el carburo de boro HIP por tener una tensión a la compresión muy superior, tal y cómo se ha observado en la etapa 1.

### III.3.4. Propiedades mecánicas de los materiales seleccionados

En este apartado se exponen las propiedades con la que se configurarán los materiales del modelo para la simulación FEM a partir de los resultados obtenidos en los procesos de selección de materiales anteriormente expuestos.

Todos los materiales han sido encontrados en el software de Granta, a excepción del tejido de UHMWPE, y los valores se han obtenido como la media entre los valores máximo y mínimo del rango en el que oscilan las propiedades según indica la base de datos de Granta.

El Módulo de Tangente es el único parámetro que no estaba registrado en el software y se ha calculado como una simplificación en base al Módulo de Young, tomando como valor un 10% del Módulo de Young, con tal de generar un diagrama de Esfuerzo-Deformación Plástica con una pendiente no muy pronunciada para que la resolución de las ecuaciones de la simulación fuera más rápida. Tan solo en el caso del Carburo de Boro, se ha tomado un valor del 5% por tratarse de un material frágil, el cual quiebra tras sobrepasar la zona elástica del diagrama y por tanto no presenta parte plástica, teniendo un Módulo de Tangente de 0; sin embargo, se observaba que los cálculos de la simulación se complicaban en exceso, por lo que se ha optado por tomar el mismo criterio, pero con un valor menor.

Tal y como se ha expuesto en el apartado III.3.2., las propiedades del tejido de polietileno se han extraído de la publicación de Zhiwei Shen et al., entre otras [13] [14] [15], y el cálculo del Módulo de Tangente ha seguido el mismo criterio anteriormente comentado.

Tabla 4. Propiedades de los materiales seleccionados

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson	Límite elástico (MPa)	Módulo de Tangente (GPa)
Pb (L50042)	1130	14	0,435	5,5	1,4
CuZn5	8675	120	0,34	265	12
Kevlar	1450	151,7	0,35	364,5	15,17
Dyneema (UHMWPE)	980	5,11	0	677,7	0,511
B4C (HIP)	2505	460,5	0,205	542,5	23
ArmoX Advance (AISI L2)	7792	209	0,29	1795	20,9

### III.4. Resumen del anexo A.4. Desarrollo

En el anexo A.4. se ha realizado una exposición detallada del proceso de modelado y simulación mediante el software Ansys Workbench, por lo que este apartado resumirá los aspectos más importantes presentes en el anexo.

Según lo comentado brevemente en el apartado III.2, y que se desarrollará con más detenimiento en el apartado A.4., el desarrollo del proyecto ha pretendido en sus inicios la creación de un modelo dinámico para la simulación del ensayo P-BFS, puesto que una simulación dinámica tiene en cuenta aspectos que varía en función del tiempo, por lo que se puede obtener una mayor aproximación de la realidad.

La configuración del modelo dinámico ha tenido en cuenta la estructura ortotrópica de las fibras para los materiales del blindaje flexible; mientras que los materiales del blindaje rígido y de la munición han presentado una estructura isotrópica en todo momento, es decir, en todos los modelos de simulación que procedan. En dicho modelo participan los cuerpos de las partes del chaleco (laminados de fibra y placa de refuerzo) y las de la bala (inicialmente el núcleo y el recubrimiento, y posteriormente solo el núcleo a modo de simplificación). El modelo dinámico se ha configurado con una herramienta de Ansys de modelado de materiales compuestos para el diseño del blindaje flexible con orientación de las fibras junto con la herramienta de análisis, sin embargo, no se ha conseguido crear un modelo dinámico que arroje resultados coherentes.

Posteriormente, se ha simplificado el modelo dinámico mediante la consideración de los materiales del blindaje flexible como estructuras isotrópicas, lo cual ha requerido a su vez adaptar el diseño. En dicho modelo participan los mismos sólidos que en el caso anterior, solo que, directamente, para la bala solo se ha empleado el núcleo. Los resultados arrojados para este caso han seguido la tendencia del caso anterior, en otras palabras, resultados faltos de sentido; sin embargo, se ha podido aprovechar una de las simulaciones, empleando un material genérico de la base de datos de Ansys, para obtener los tiempos de inicio (momento en que la bala toma contacto con el chaleco) y fin (momento en que la bala se frena totalmente) del impacto del proyectil.

Finalmente, el proyecto ha sufrido otra simplificación pasando de un modelo dinámico a un modelo estático. En el modelo estático se sustituyen los sólidos de las balas por la aplicación de una fuerza sobre un área. Esto ha supuesto la necesidad de modificar el diseño del caso anterior. Bajo el modelado estático sí

se ha obtenido resultados coherentes y, partiendo de experimentación hasta obtener los espesores ideales para la configuración de blindaje con Kevlar ( 2 zonas: anterior y posterior, cada una con una disposición de 4 capas de Kevlar + 1 capa de refuerzo de Carburo de Boro + 4 capas de Kevlar, siendo el espesor por capa de laminado de 1,25 mm y 5 mm en el caso del refuerzo), se han realizado distintas variaciones con el UHMWPE y los distintos materiales de refuerzo hasta alcanzar la solución optimizada ( 2 zonas: anterior y posterior, cada una con una disposición de 4 capas de UHMWPE + 1 capa de refuerzo de Carburo de Boro + 4 capas de UHMWPE, siendo el espesor por capa de laminado de 1,5 mm y 6 mm en el caso del refuerzo).

La configuración que ha resultado ganadora ha sido la del UHMWPE, la cual presenta una disminución del 14% en masa y del 37% en deformación, con respecto a la configuración de Kevlar.



### III.5. Diseño final.

Según lo comentado brevemente en el apartado III.4 y desarrollado en detalle en el apartado A.4., el diseño final estará compuesto por un blindaje flexible de UHMWPE y un blindaje rígido de Carburo de Boro.

El diseño, que se corresponde con el mostrado en la Ilustración 46, presentará un total de 4 laminados de UHMWPE y 2 placas de Carburo de Boro, tal y como se muestra en la Ilustración 47. Cada laminado estará compuesto de 4 capas de 1,5 mm de espesor cada una, mientras que los refuerzos tendrán una capa única de 6 mm de espesor.



## III.6. Resumen del anexo A.5. Fabricación

En el anexo A.5. se ha realizado una selección y una posterior exposición detallada de los procesos de fabricación que permitiría la manufactura de los diseños finales del apartado A.2. para los materiales seleccionados en el apartado III.3., por lo que este apartado resumirá los aspectos más importantes presentes en el anexo.

Partiendo de la selección a través del software Granta EduPack 2021 R2 y, aplicando criterios de segregación según geometría y material, se ha planteado la fabricación de:

- Blindaje rígido: obtención de la materia prima mediante reducción carbotérmica y procesos de molienda, y la fabricación de la pieza definitiva por prensado isostático en caliente o moldeo por inyección de cerámicos. En lo respectivo a la fabricación de la pieza, se ha escogido finalmente el proceso de inyección debido a su mayor capacidad de producción y menores costes de inversión inicial.
- Blindaje flexible: fabricación del hilo mediante extrusión de polímeros y posteriormente hilado en gel, laminación de las fibras mediante Pre-impregnados y corte de los laminados mediante corte por chorro de agua. Adicionalmente habría que añadir un proceso textil para la unión de los laterales del chaleco y de los tirantes, pero se ha omitido por considerarse que la parte textil del chaleco no entra dentro de los objetivos marcados, puesto que el foco se ha puesto en los procesos de fabricación que resultan interesantes desde el punto de vista técnico y mecánico, no desde el textil.



### III.7. Resumen del anexo A.6. Estudio económico.

En el anexo A.6. se ha realizado un estudio de la viabilidad económica de producción de los diseños para el planteamiento comentado en el apartado A.5.2., por lo que este apartado resumirá los aspectos más importantes presentes en el anexo.

El estudio económico se ha realizado mediante el VAN (Valor Actualizado Neto), que es un indicador económico que permite determinar si una inversión es rentable y a partir de qué momento en el tiempo. Para el empleo de la fórmula se han tenido que determinar previamente los costes de los procesos y los ingresos generados.

En lo respectivo a los costes, habría que diferenciar los costes fijos de los costes variables. Los costes fijos son gastos que se mantienen invariables en un periodo analizado, mientras que los costes variables son dependientes de algún parámetro, como puede ser el caso de las unidades fabricadas.

El análisis del VAN se ha realizado separando los datos relativos al blindaje flexible de los datos del blindaje rígido, debido a que este último tiene una producción muy superior, lo que obliga a vender el excedente por separado del conjunto del chaleco. Para ambos casos se han tenido en cuenta los costes de infraestructura, maquinaria, herramientas y moldes, materia prima, servicios subcontratados, mantenimiento, coste energético, etc.

Mediante la división de todos los costes entre las unidades producidas, se ha calculado el coste de fabricación por cada chaleco fabricado. Posteriormente se ha fijado el precio de venta comparando con productos similares en el mercado y con el objetivo de generar beneficios. Los costes de fabricación por cada unidad son, de media, 180,13€ y 392,59€ para el blindaje rígido y el blindaje flexible, respectivamente. Por lo tanto, el conjunto completo del chaleco tendría un coste medio de fabricación de 752,86€. Teniendo en cuenta los costes de fabricación, se han marcado los precios de venta (340€ para la placa de refuerzo y 500€ para la parte flexible, por lo tanto 1.180€ para el conjunto completo).

Finalmente, se ha comprobado que la fabricación de ambos productos por separado es rentable (a partir del primer año para el blindaje rígido y del segundo año para el blindaje flexible) y permite reportar unos beneficios acumulados de 133.301.032,78 € a lo largo de los cuatro años analizados.



### III.8. Conclusiones.

El objetivo de este apartado es la retrospectiva del trabajo desarrollado que se ha plasmado en el presente TFG y la comprobación de los objetivos generales y particulares alcanzados.

Tras la revisión del desarrollo realizado y los resultados obtenidos se puede dar por hecho que los objetivos generales y la mayoría de los particulares han sido cumplidos:

- El objetivo particular 3 no se ha alcanzado, pero se sí se ha llegado a la creación de un modelo de simulación más simple (estático) para la evaluación de los resultados
- El objetivo general 1 se ha alcanzado mediante la consecución de los objetivos particulares 1, 2, 3 (tomando como objetivo particular 3 lo comentado en el punto anterior) y 4.
- El objetivo general 2 se ha alcanzado mediante la consecución de los objetivos particulares 4 y 5. El rediseño del chaleco (objetivo particular 5) ha tenido lugar al mismo tiempo que realizaba el estudio de deformaciones del objetivo particular 4, para dar lugar al conjunto de simulaciones mostradas en la Tabla 9.
- Finalmente, los objetivos particulares 6 y 7 han permitido constatar que el diseño realizado es viable de fabricar y, aun pudiéndose ajustar los planes de fabricación, el proyecto es capaz de reportar grandes beneficios.

Por otra parte, cabe destacar que la no consecución del modelo dinámico implica que los resultados obtenidos pueden distar algo de la realidad y, por tanto, el estudio no se debe tomar como una representación fiel de la realidad para su directa aplicación industrial, pero sí es una aproximación que permite hacer una previsión estimada. Aun habiéndose conseguido crear el modelo dinámico, es altamente recomendable la creación de un prototipo a escala real para su ensayo en un laboratorio según la normativa, con el fin de emplear los datos recogidos para mejorar el diseño y el modelo antes de pasar a la fase de producción.

Anexos

Anexos



# A.1. Normativa aplicable

En este apartado se explicará la normativa que se ha seguido para la correcta experimentación del modelo.

En España, a fecha de la redacción de este Trabajo de Final de Grado, no existe ninguna normativa española que regule la homologación de chalecos antibalas y demás materiales de protección balística personal. Sin embargo, como país miembro de la OTAN, España está sujeto a algunas normativas o estándares cuyo cumplimiento no es obligatorio, pero sí recomendable. Uno de estos ejemplos es la norma STANAG 2920 PPS (Ed.2) (2003)[16].

Finalmente, para que no hubiese lugar a dudas, el 10 de diciembre de 2007, la Dirección General de Armamento y Materiales perteneciente al Ministerio de Defensa, comunicó la Resolución 320/38217/2007 (incluida en el BOE núm. 305, de 21 de diciembre de 2007, página 52955) en la cual se concedía la potestad de homologación y ensayo de la resistencia balística de materiales para chalecos y paneles para protección personal antibala[17].

En dicha resolución, se especifica la normativa que se debe seguir para los ensayos de certificación, haciendo mención a la ya mencionada STANAG 2920 PPS (Ed.2) (2003) y a la NIJ 0101.04 (2001).

Para la investigación de este TFG se ha optado por seguir la normativa NIJ, de origen estadounidense. El motivo por el que se ha realizado de esta manera radica en el mayor volumen de información disponible en la red con respecto a los estándares de armamento y protección balística estadounidenses. Por otra parte, dado que en el apartado I.4. se ha analizado la evolución del blindaje personal junto con el nivel de protección aportado según normativa NIJ, se ha considerado como la opción más lógica para poder comprender dicha evolución histórica.

Sin embargo, aunque en el BOE se mencione la norma NIJ 0101.04 de 2001, el análisis se ha centrado en la norma NIJ 0101.06 de 2008[18], que supone una actualización frente a la anterior normativa.

## A.1.1. NIJ 0101.06

La NIJ 0101.06-Ballistic Resistance of Body Armor fue una normativa redactada en 2008 por el National Institute of Justice, perteneciente al Departamento de Justicia de los EE. UU.

El objetivo de esta norma es establecer los requisitos mínimos de rendimiento y los métodos de prueba para la resistencia balística de los chalecos antibalas destinados a proteger contra los disparos. Para ello, se realizan una serie de ensayos en dos modalidades: con equipamiento nuevo y con equipamiento acondicionado. Posteriormente, se clasifica la protección en 6 niveles que van aumentando la protección ofrecida en un orden ascendente:

- Tipo IIA: este ensayo certifica una resistencia mínima ante munición de 9 mm FMJ RN y de 10x22 mm Smith & Wesson FMJ (.40 S&W).

Para los ensayos con equipamiento nuevo se requiere munición de 9mm con camisa metálica y punta redonda (FMJ RN) con una masa especificada de 8,0 g y una velocidad de  $373 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ , y balas del calibre .40 S&W con camisa metálica (FMJ) con una masa especificada de 11,7 g y una velocidad de  $352 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ .

Para los ensayos con equipamiento acondicionado se requiere munición de 9mm FMJ RN con una masa especificada de 8,0 g y una velocidad de  $355 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ , y balas del calibre .40 S&W FMJ con una masa especificada de 11,7 g y una velocidad de  $325 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ .

- Tipo II: este ensayo certifica una resistencia mínima ante munición de 9 mm FMJ RN y de 9x33 mm JSP (.357 Magnum)

Para los ensayos con equipamiento nuevo se requiere munición de calibre 9 mm FMJ RN con una masa especificada de 8 g y una velocidad de  $398 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ , y balas del calibre .357 Magnum de punta blanda encamisada con una masa especificada de 10,2 g y una velocidad de  $436 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ .

Para los ensayos con equipamiento acondicionado se requiere munición de calibre 9 mm FMJ RN con una masa especificada de 8 g y una velocidad de  $379 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ , y balas del calibre .357 Magnum JSP con una masa especificada de 10,2 g y una velocidad de  $408 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ .

- Tipo IIIA: este ensayo certifica una resistencia mínima ante munición de 9x22 mm FMJ FN (.357 SIG) y de 9x33 mm SJHP (.357 Magnum)

Para los ensayos con equipamiento nuevo se requiere munición de calibre .357 SIG FMJ de punta plana con una masa especificada de 8,1 g y una velocidad de  $448 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ , y balas del calibre .357 Magnum de punta hueca semi-encamisada con una masa especificada de 15,6 g y una velocidad de  $436 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ .

Para los ensayos con equipamiento acondicionado se requiere munición de calibre .357 SIG FMJ FN con una masa especificada de 8,1 g y una velocidad de  $430 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ , y balas del calibre .357 Magnum SJHP con una masa especificada de 15,6 g y una velocidad de  $408 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ .

- Tipo III: este ensayo certifica una resistencia mínima ante munición de 7,62 mm FMJ M80.

Los ensayos de cualquier equipo bajo este nivel de certificación requieren munición de calibre 7,62 mm FMJ M80 con una masa especificada de 9,6 g y una velocidad de  $847 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ . Las condiciones de los equipos con los que se realizará en ensayo son: blindaje flexible en estado nuevo y también en estado acondicionado, blindaje rígido (refuerzos balísticos) en estado acondicionado; y, en el caso de conjuntos blindaje flexible + blindaje rígido, se realizarán las pruebas en las condiciones anteriores, además de ensayar el conjunto completo.

- Tipo IV: este ensayo certifica una resistencia mínima ante munición de 7,62 mm M2 AP.

Los ensayos de cualquier equipo bajo este nivel de certificación requieren munición de calibre 7,62 mm antiblindaje de bola con una masa especificada de 10,8 g y una velocidad de  $878 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ . Las condiciones de los equipos con los que se realizará en ensayo son: blindaje flexible en estado nuevo y también en estado acondicionado, blindaje rígido (refuerzos balísticos) en estado acondicionado; y, en el caso de conjuntos blindaje flexible + blindaje rígido, se realizarán las pruebas en las condiciones anteriores, además de ensayar el conjunto completo.

- Tipo Especial: en el caso que un comprador tenga un requerimiento especial para un nivel de protección diferente a uno de los tipos y niveles de amenaza estándar anteriores, debe especificar la(s) bala(s)

de prueba exacta(s) y las velocidades de medición de referencia que se utilizarán e indicar que esta norma regirá todos los demás aspectos. La NIJ 0101.06 ofrece orientación sobre las amenazas comunes de tipo especial y las velocidades de amenaza adecuadas, junto con una metodología para determinar la velocidad de referencia correcta para otras amenazas.

### A.1.2 Requisitos de las muestras y configuración del laboratorio.

Los requisitos para llevar a cabo correctamente los ensayos de la certificación NIJ-0101.06 comprenden desde la cuantificación del número de muestras y su estado, hasta el tipo de equipamiento, la temperatura y demás variables que deben estar controladas para poder asegurar que todos los ensayos se realicen en igualdad de condiciones. En este apartado se expondrán los aspectos más relevantes de la norma, obviando aquello que no influye en el desarrollo de este TFG.

#### A.1.2.1 Muestras del ensayo.

Los requisitos relativos al muestreo se agrupan de la siguiente forma:

- Muestreo de blindaje flexibles para certificaciones IIA, II y IIIA:

Para la certificación de los niveles de protección IIA, II y IIIA se requiere de un total de 28 chalecos, 22 de los cuales de talla grande y los 6 restantes de una talla pequeña. Además, 16 de los chalecos grandes y 4 de los pequeños deben presentar un estado considerado como “nuevo”; mientras que el resto (6 chalecos grandes y 2 pequeños) deben ser acondicionados.

De las muestras nuevas, se emplearán 4 chalecos grandes y 4 pequeños para el ensayo de P-BFS, de los que la mitad de los dos tipos se emplearán en cada tipo de munición. Por otra parte, se guardarán 2 chalecos grandes como unidades de repuesto. Finalmente, los 10 últimos chalecos grandes se emplearán en el ensayo de BL, destinando cada mitad a las diferentes municiones empleadas.

De las muestras acondicionadas, se emplearán 2 chalecos grandes y 2 pequeños para el ensayo de P-BFS, de los que la mitad de los dos tipos se emplearán en cada tipo de munición. Por otra parte, se guardarán 2 chalecos grandes como unidades de repuesto. Finalmente, los 2 últimos chalecos grandes se emplearán en el ensayo de BL, destinando cada mitad a las diferentes municiones empleadas.

- Muestreo de blindaje flexibles para certificaciones III, IV y Tipo Especial:

Para la certificación de los niveles de protección III, IV y Tipo Especial se requiere de un total de 14 chalecos, 11 de los cuales de talla grande y los 3 restantes de una talla pequeña. Además, 8 de los chalecos grandes y 2 de los pequeños deben presentar un estado considerado como “nuevo”; mientras que el resto (3 chalecos grandes y uno pequeño) deben ser acondicionados.

De las muestras nuevas, se emplearán 2 chalecos grandes y 2 pequeños para el ensayo de P-BFS. Por otra parte, se guardará un chaleco grande como unidad de repuesto. Finalmente, los 5 últimos chalecos grandes se emplearán en el ensayo de BL.

De las muestras acondicionadas, se emplearán un chaleco grande y uno pequeño para el ensayo de P-BFS. Por otra parte, se guardará un chaleco grande como unidades de repuesto. Finalmente, el último chaleco grande se empleará en el ensayo de BL.

- Muestreo para certificación III en blindaje rígido y refuerzos balísticos:

El blindaje rígido para el nivel de protección III tiene que ser lo suficientemente grande como para poder recibir 6 disparos distanciados según lo establecido en el apartado III.1.2.5. Se requiere de un total de 9 placas en estado acondicionado, de las cuales 4 se destinarán al ensayo P-BFS, otras 4 al ensayo de BL y una será la unidad de repuesto.

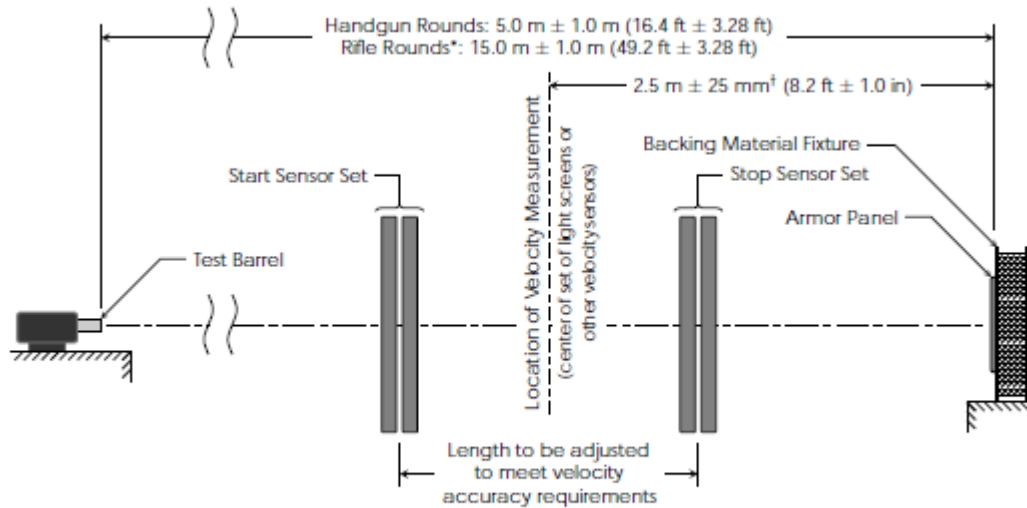
- Muestreo para certificación IV en blindaje rígido y refuerzos balísticos:

El blindaje rígido para el nivel de protección IV, el cual también debe ser acondicionado, presenta unas exigencias más flexibles que en el caso anterior. Dado que el número de disparos que se exige que resista cada placa oscila entre 1 y 6, la cantidad de placas que se requerirá será de entre 7 y 37. De esta forma, para el ensayo de P-BFS, al requerirse 24 disparos se emplearán entre 4 y 24 placas; una placa se guardará como repuesto y se emplearán entre 2 y 12 placas para el ensayo de BL, ya que se requieren de 12 disparos para dicha prueba.

### A.1.2.2 Condiciones de ensayo

El blindaje se ensayará en una instalación y con un equipo de ensayo que cumpla los siguientes requisitos:

- Temperatura ambiental del equipamiento:  $21\text{ °C} \pm 2,9\text{ °C}$ .
- Humedad relativa ambiental:  $50\% \pm 20\%$ .
- Distancia del panel de blindaje al cañón: Para los disparos de munición de pistola, el panel de blindaje se montará a  $5,0\text{ m} \pm 1,0\text{ m}$ , mientras que, para los disparos de rifle, el panel de blindaje deberá montarse a  $15\text{ m} \pm 1,0\text{ m}$ .



\*For rifle rounds the length may be further adjusted to minimize yaw at impact; however, in such cases the yaw at impact must be experimentally shown to be less than 5° and reasonably close to minimal.  
<sup>†</sup>Tolerance for 0° shots. For 30° and 45° shots the tolerance shall be + 25 mm/- 190 mm (+ 1.0 in/- 7.5 in).

Ilustración 27. Esquema de los requisitos de instalación de los equipos para la homologación bajo norma NIJ 0101.06

Tal y cómo se muestra en la Ilustración 27, el cañón de prueba debe colocarse a 5m ± 1 m en las pruebas con munición de pistola (niveles II, IIA y IIIA) y a 15m ± 1 m para las municiones de rifle (niveles III, IV y Especial). Los comentarios relativos a los ángulos de incidencia y distancias de colocación de sensores no se exponen debido a que no son relevantes para el desarrollo de este TFG.

### A.1.2.3 Protocolo de acondicionamiento para blindaje flexible

De forma adicional a las condiciones de ensayo mencionadas en el apartado A.1.2.2., existe un protocolo de acondicionamiento que consistiría en un período de aclimatación de 24 horas para asegurar que todas las muestras de blindaje comienzan con las mismas condiciones, seguido de un período de 10 días de exposición a la temperatura, la humedad y el desgaste mecánico.

Dicho protocolo solo aplica a aquellas protecciones que se han reservado para los ensayos con chalecos y placas acondicionados.

Las condiciones ambientales para el protocolo de acondicionamiento son las siguientes:

- Temperatura de acondicionamiento:  $25\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ .
- Humedad relativa de acondicionamiento: del 20% al 50%.
- Temperatura de ensayo de desgaste mecánico:  $65\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ .
- Humedad relativa del ensayo de desgaste mecánico:  $80\% \pm 5\%$ .

Finalmente, el orden del proceso sería el siguiente:

1. Una vez se disponga de un conjunto de muestras lo suficientemente grande, se colocarán las muestras en un entorno de laboratorio controlado durante al menos 24 horas antes de comenzar el ensayo, exponiendo las muestras a las condiciones ambientales de acondicionamiento.
2. Se colocará el conjunto de muestras dentro de la secadora en las condiciones relativas al ensayo de desgaste mecánico durante un periodo de 10 días  $\pm$  1h al régimen de revoluciones indicado en la norma.
3. Los blindajes se devolverán a las condiciones previas a la prueba, es decir, las condiciones ambientales de acondicionamiento, durante un mínimo de 12 horas antes de comenzar la prueba balística.
4. Previamente al inicio de la prueba de impacto balístico, se examinará visualmente y de forma exhaustiva cada muestra y se documentará cualquier cambio en el aspecto físico resultante de la exposición.

#### A.1.2.4 Protocolo de acondicionamiento para blindaje rígido.

Igual que ocurre con el acondicionamiento del blindaje flexible expuesto en el apartado III.1.2.3, las placas rígidas también poseen un protocolo de acondicionamiento, el cual consistiría en un período de aclimatación de 24 horas para asegurar que todas las muestras de blindaje comienzan con las mismas condiciones, seguido de un período de 10 días de exposición térmica uniforme, una exposición a un ciclo térmico y unas pruebas de durabilidad mecánica.

Dicho protocolo solo aplica a aquellas protecciones que se han reservado para los ensayos con chalecos y placas acondicionados.

Las condiciones ambientales para el protocolo de acondicionamiento son las siguientes:



- Temperatura de acondicionamiento:  $25\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ .
- Humedad relativa de acondicionamiento: del 20% al 50%.
- Temperatura de ensayo de desgaste mecánico:  $65\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ .
- Humedad relativa del ensayo de desgaste mecánico:  $80\% \pm 5\%$ .

El ensayo de ciclo térmico se trata de una prueba de 24 h de duración ininterrumpida en la que se somete a unas condiciones de temperatura y humedad determinadas a franjas de 2h hasta haber expuesto las placas a todas las situaciones del ciclo. Atendiendo a la Tabla 5. Condiciones del ensayo de ciclo térmico, el orden para la ejecución del ensayo sigue un sentido descendente, es decir, se deberá empezar por la primera fila de datos y se continuará con la siguiente fila de datos que se encuentre por debajo de esta última, así hasta llegar a completar todas las condiciones de la tabla y finalizar el ciclo

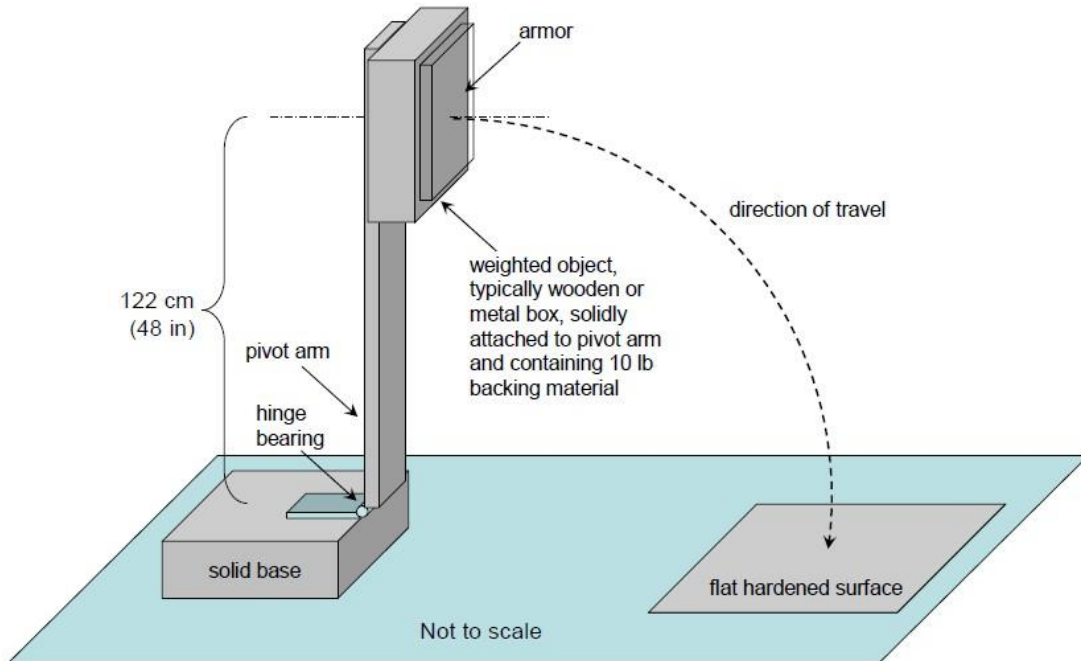
*Tabla 5. Condiciones del ensayo de ciclo térmico*

Tiempo (horas)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
2	25	50
2	15	N/A
2	5	N/A
2	-5	N/A
2	-15	N/A
2	0	N/A
2	15	N/A
2	30	50
2	45	50
2	60	50
2	75	50
2	90	50

El procedimiento de acondicionamiento para blindaje rígido se detalla a continuación:

1. Cuando se reciban las muestras, se colocarán en un entorno de laboratorio controlado durante 24 horas a temperatura y humedad de acondicionamiento.
2. Se situarán las placas dentro de la cámara en las condiciones especificadas de temperatura y humedad relativa para el ensayo de desgaste mecánico durante un periodo de 10 días.
3. Se deberá realizar un examen visual minucioso del elemento de prueba y documentar cualquier cambio en el aspecto físico resultante de la exposición.
4. Se efectuará la exposición de las placas a las condiciones del ensayo de ciclo térmico, especificadas en la Tabla 5. Condiciones del ensayo de ciclo térmico, teniendo una duración de 24 horas.
5. Tras el ensayo de ciclo térmico se realizará otro examen visual minucioso del elemento de prueba y se documentará cualquier cambio en el aspecto físico resultante de la exposición.
6. Finalmente, se llevará a cabo la prueba de caída de las placas, sujetándose con una correa, un cinturón u otro dispositivo de retención no obstructivo a la superficie frontal de unos 4,5 kg de material de respaldo (el mismo usado en el ensayo P-BFS). Para el material de respaldo se usará arcilla y deberá estar contorneada a la superficie posterior de la placa, la cual suele presentar cierta curvatura. Si la placa es parte de un sistema en conjunto, la placa deberá ser respaldada para las pruebas de caída por el diseño de armadura flexible en conjunto que se pretende vender con la placa. Este diseño de blindaje flexible debe ser suministrado por el fabricante en tamaño de plantilla NIJ-C-2. Esta armadura flexible se colocará entre la armadura y el objeto con peso como se muestra en la Ilustración 28. Si la placa está destinada a ser vendida como un artículo independiente, no se utilizará ningún respaldo de armadura flexible en las pruebas de caída. Se ha demostrado que una fijación similar a la mostrada en la Ilustración 28 proporciona resultados precisos y reproducibles. Para más detalles y especificaciones sobre este dispositivo, véase la publicación titulada *Description of Fixture for Hard Armor Drop Testing According to NIJ Standard-0101.06*. A una altura mínima de caída libre de 1,2 m (90° desde la horizontal) desde la superficie plana endurecida y con la cara de impacto de la armadura apuntando hacia abajo, se deberá dejar caer el dispositivo

con peso dos veces. Los impactos deben producirse en el centro de la cara (no en un borde).



*Ilustración 28. Ejemplo de un dispositivo válido para la prueba de caída para placas*

Tal y como se muestra en la Ilustración 28; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el dispositivo constaría de una base sólida, un brazo pivotante unido a la base mediante una bisagra, un objeto de apoyo para el blindaje (habitualmente siendo madera o una caja metálica con una masa de unos 4,5 kg) y una superficie plana dura donde impacta la placa. El brazo pivotante debe tener tal longitud que el centro de gravedad de la placa debe situarse a 122 cm de la base sólida.

### A.1.2.5 Métodos de ensayo balístico

Existen dos tipos de pruebas para el testeo de las capacidades de resistencia balística.

La primera serie de pruebas es el ensayo P-BFS (Perforation-Backface Signature) y requiere que el blindaje demuestre una resistencia balística consistente tanto a la perforación como al traumatismo por objeto contundente excesivo. La segunda serie de pruebas es la prueba BL (Ballistic

Limit) y está diseñada para estimar estadísticamente el rendimiento de la perforación.

Existen una serie de requisitos previos a tener en cuenta antes de iniciar las pruebas P-BFS y BL:

- Requisitos para un impacto válido: Para que un disparo se considere válido, su ángulo de incidencia no debe ser mayor a  $\pm 5^\circ$  con respecto al ángulo de incidencia previsto y respetar siempre la distancia mínima al borde del panel balístico y la distancia mínima entre disparos.

Por otra parte, además en las pruebas P-BFS, se exige cumplir alguno de estos requisitos: que la velocidad del proyectil se encuentre en el rango marcado ( $\pm 9,1$  m/s de la velocidad de referencia del proyectil especificado), que la velocidad sea menor al rango marcado, pero produzca una perforación o una deformación de la cara posterior excesiva, o que la velocidad supere el rango marcado y no produzca una perforación o una deformación de la cara posterior excesiva.

- Distancia mínima al borde: Para los tipos de blindaje sometidos a un único tipo de munición y para las municiones más ligeras cuando se especifican dos tipos de balas, la distancia mínima de disparo al borde no será mayor de 51 mm. Para los proyectiles más pesados cuando se especifican dos tipos de bala, la distancia mínima de disparo al borde no debe ser mayor de 76 mm.
- Distancia mínima entre disparos: La distancia mínima de disparo a disparo será de 51 mm

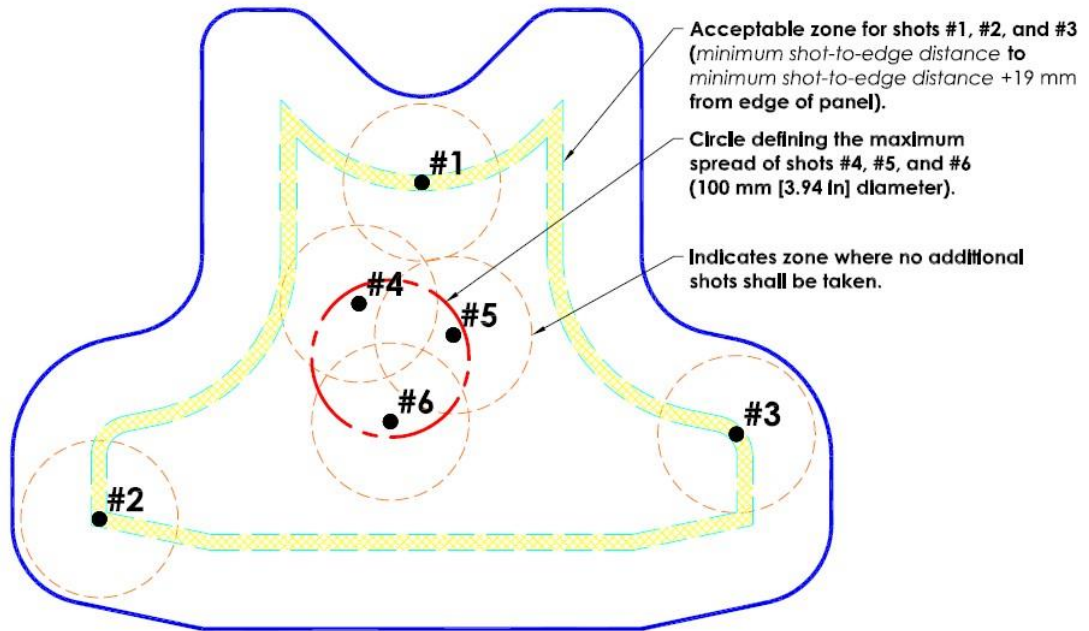


Ilustración 29. Esquema de un chaleco y los aspectos a tener en cuenta sobre la localización del disparo

La Ilustración 29 muestra un ejemplo de una posible distribución de los disparos en un ensayo balístico. El área amarilla delimita la superficie hasta la que se puede impactar, es decir, para cumplir el requisito de distancia mínima al borde no se puede sobrepasar dicha área. El requisito de distancia máxima entre disparos se observa en el círculo de color rojo intenso, dentro del cual se deben encontrar todos los impactos que se quieran agrupar; mientras que los círculos de color rojo atenuado indican la distancia mínima entre disparos, lo que implica que dentro de su área no se puede encontrar otro impacto de proyectil.

#### A.1.2.6 Ensayo P-BFS

Todas las muestras de blindaje presentadas se someterán a las pruebas de perforación y deformación de la cara posterior (Perforation and Backface Signature) utilizando las municiones especificadas en la Tabla 6. Resumen de los requisitos para la ejecución de la prueba P-BFS. Estas pruebas de impacto miden la deformación en la cara posterior y demuestran la resistencia del blindaje a la perforación. Para ello, se requiere el uso de un material que haga de testigo y se deforme plásticamente (arcilla) en contacto directo con la parte trasera del panel de blindaje, de forma que se pueda capturar y medir la

depresión BFS producida en el material de soporte durante los impactos de los proyectiles no perforantes.

Cabe destacar que, de forma previa a la realización del ensayo, todas las muestras de blindaje flexible clasificadas como nuevas y todas las muestras de blindaje rígido se someterán a una inmersión en agua. Las muestras se sumergirán  $100\text{ mm} \pm 25\text{ mm}$  por debajo de la superficie del agua durante 30-35 min. Posteriormente se dejarán secar durante 10-15 min

Tabla 6. Resumen de los requisitos para la ejecución de la prueba P-BFS

Variables de la prueba					Requisitos de ejecución			Requisitos de los disparos					
Tipo de blindaje	Tipo de munición	Masa de la bala	Velocidad en blindaje acondicionado	Velocidad en blindaje nuevo	Disparos por panel a ángulo 0°	Máxima profundidad BFS	Disparos por panel a ángulos 30° o 45°	Disparos por panel	Tamaño de panel	Condiciones del panel	Paneles requeridos	Disparos requeridos	Total de disparos requeridos
IIA	9 mm FMJ RN	8 g	355 m/s	373 m/s	4	44 mm	2	6	Grande	Nuevo	4	24	144
	.40 S&W FMJ	11.7 g	325 m/s	352 m/s						Acondicionado	2	12	
Pequeño									Nuevo	4	24		
	Acondicionado	2	12										
II	9 mm FMJ RN	8g	379 m/s	398 m/s					Grande	Nuevo	4	24	144
	.357 Magnum JSP	10.2 g	408 m/s	436 m/s						Acondicionado	2	12	
Pequeño									Nuevo	4	24		
	Acondicionado	2	12										
IIIA	.357 SIG FMJ FN	8.1 g	430 m/s	448 m/s					Grande	Nuevo	4	24	144
										Acondicionado	2	12	
	.44 Magnum SJHP	15.6 g	408 m/s	436 m/s	Pequeño	Nuevo	4	24					
						Acondicionado	2	12					
III	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g	847 m/s	-	6	0	Cualquiera	Acondicionado	4	24	24		
IV	.30 M2 AP	10.8 g	878 m/s	-	1 a 6	0	1 a 6	Cualquiera	Acondicionado	4 a 24	24	24	
Especial	Cada munición probada será especificada por el fabricante o por la organización adquisidora del producto				El rendimiento del blindaje y los requisitos relativos a los disparos dependerán del tipo de blindaje								

Cada panel de prueba debe resistir el número apropiado de impactos válidos y no puede experimentar ninguna perforación. Cualquier perforación completa por un impacto válido supone una falla. Dependiendo del conjunto de muestras se actuará de una forma u otra:

- Muestras nuevas: Cada muestra ensayada de un modelo de blindaje no podrá tener mediciones de profundidad BFS mayores a 44 mm, o para cada bala una probabilidad estimada para una sola medición superior a 44 mm de menos del 20 % con un intervalo de confianza del 95 %. Ninguna medición podrá superar los 50 mm, y, en el caso de las muestras con una deformación superior a 44 mm, se comprobará la probabilidad con la siguiente fórmula:

$$Y + k_1*s \leq 44 \text{ mm}$$

En la fórmula, Y es el promedio de todas las mediciones de deformación de la cara posterior para las muestras de blindaje de un modelo, tamaño, condición y munición de testeo en particular; s es la desviación estándar de la muestra del mismo conjunto de mediciones de BFS; y k1 es un factor que debe determinarse de manera que el intervalo cubra la proporción adecuada, p, con una confianza de  $\gamma$ .

- Muestras acondicionadas: Para los blindajes flexibles que han sido sometidos al protocolo de acondicionamiento, se registrará la profundidad de la BFS, pero un exceso de BFS no constituirá un fallo.

### A.1.2.7 Ensayo de Límite Balístico

El límite balístico es un parámetro que establece la velocidad a partir de la cual un proyectil determinado penetra de forma fiable un material, es decir, con al menos un 50% de probabilidad. Esto implica que, por lo general, cuando la velocidad del proyectil sea inferior al límite balístico del material, este no lo perforará.

Este ensayo sigue las directrices definidas en las secciones 5.3.3 y 5.3.5 de la norma MIL-STD- 662F. Se realizarán secuencias de 12 disparos repartidos en una o más muestras, dependiendo de la resistencia de ellas, y se continuará hasta alcanzar el número total de disparos definidos en la Tabla 6. Resumen de los requisitos para la ejecución de la prueba P-BFS.



Se deberán cumplir los siguientes requisitos:

- En cualquier blindaje (flexible o rígido) no se podrán producir perforaciones a la velocidad máxima de impacto P-BFS (velocidad de referencia P-BFS + 9,1 m/s).
- En los blindajes nuevos, la probabilidad estimada de perforación completa a la velocidad de referencia P-BFS debe ser inferior al 5 %. Es decir, se tendrá que cumplir esta igualdad:  $V_{05,nuevo} \geq V_{ref,nuevo}$ .

Para que los resultados del ensayo de límite balístico sean concluyentes, se tienen que cumplir las condiciones descritas en la Tabla 7 y la Tabla 8.

*Tabla 7. Resumen de los aspectos estándar para la determinación de Límite Balístico*

Nivel de protección	Munición requerida	Paneles balísticos requeridos	Disparos mínimos requeridos	Resultados mínimos
IIA, II y IIIA	Bala 1	10	120	60 paradas y 30 perforaciones
	Bala 2	10	120	60 paradas y 30 perforaciones
III	7.62 mm M80 FMJ	4	24	12 paradas, 6 perforaciones y 6 resultados cualesquiera
IV	.30 M2 AP	2-12	12	6 paradas, 3 perforaciones y 3 resultados cualesquiera

Tabla 8. Parámetros y requisitos de ensayo para la prueba de límite balístico

Descripción del parámetro	Valor	Sección de referencia en la MIL-STD-662F
Velocidad del primer disparo	La velocidad de referencia del tipo de blindaje para el calibre concreto (Tabla 6)	5.3.3
Velocidad hasta el primer cambio de tendencia	-30.5 m/s si el primer disparo era una perforación	5.3.5
	-30.5 m/s si el primer disparo era una parada	Excepción a la 5.3.5
Velocidad hasta el segundo cambio de tendencia	$\pm 22.9$ m/s, dependiendo de los resultados del disparo previo	5.3.5
Velocidad tras el segundo cambio de tendencia	$\pm 15.2$ m/s, dependiendo de los resultados del disparo previo	5.3.5

Una vez completada la prueba de límite balístico, los resultados de la prueba deben ser analizados para cada munición realizando una regresión para estimar cuál será el rendimiento del blindaje en un rango de velocidades. En particular, el análisis debe tratar de estimar la velocidad en la que la probabilidad de perforación se vuelve razonablemente pequeña.

La regresión logística puede realizarse sobre los datos utilizando el método de máxima verosimilitud para estimar los parámetros logísticos  $\beta_0$  y  $\beta_1$ , que son la constante logística estimada y el coeficiente de velocidad estimado, respectivamente. Estos parámetros definen la forma de la curva logística en forma de S, que se define como:

$$\pi(v) = \frac{e^{\beta_0 + v\beta_1}}{1 + e^{\beta_0 + v\beta_1}}$$

Aquí  $\pi(v)$  es la probabilidad de que se produzca una perforación completa a la velocidad,  $v$ . A partir de los parámetros logísticos estimados, el límite balístico puede determinarse como:

$$\hat{v}_0 = \frac{-\hat{\beta}_0}{\hat{\beta}_1}$$

Además, la velocidad a la que la probabilidad de una perforación completa es  $x\%$ ,  $\hat{v}_x$ , puede determinarse como:

$$\hat{\gamma}_x = \frac{\ln\left(\frac{x}{1-x}\right) - \hat{\beta}}{\hat{\beta}}$$

Los parámetros logísticos estimados para una armadura condicionada y su límite balístico pueden determinarse con el mismo método; sin embargo, hay que tener cuidado cuando el análisis se realiza sobre un conjunto de datos relativamente pequeño, ya que la fiabilidad de la probabilidad de perforación estimada será escasa para conjuntos de datos pequeños.



# A.2. Diseño

Este apartado recoge todos los diseños realizados para materializar y hacer más simple la visualización del producto que este TFG pretende mostrar, ya sea para una supuesta puesta en producción o para un análisis mecánico de las capacidades del prototipo.

En los siguientes apartados se recogen todas las etapas de diseño que han seguido los distintos bocetos hasta llegar a asemejarse a los productos que existen en el mercado, así como los diseños que se han desarrollado para aportar soluciones simplificadas a determinados problemas que se han originado.

El software empleado para todo el proceso de diseño ha sido SolidWorks 2020 con una licencia de estudiante.

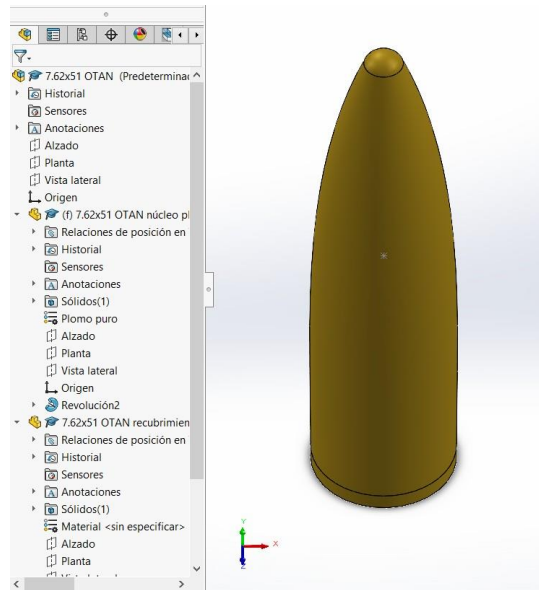
## A.2.1. Diseño general

Este apartado comprende el conjunto de diseños que se considera que son más cercanos a la realidad y por tanto se consideran como la visualización real de los productos que se pueden encontrar actualmente en el mercado, por lo que serían objeto de ser fabricados a su imagen y semejanza

### A.2.1.1. Diseño de la munición

Este apartado se ha centrado en desarrollar un dibujo mediante CAD de la munición que será empleada para la simulación FEM del ensayo de Perforación-Deformación de la Cara Posterior (P-BFD) para un conjunto de chaleco antibalas. Tal y como se indicará en el apartado A.1.2.6., el nivel de protección ensayado requiere de una munición de calibre 7,62x51 de la OTAN de tipo M80, es decir, de punta de bola. El diseño finalmente creado, tal y como se muestra en la Ilustración 30, es una representación aproximada para una bala de ese tipo, puesto que no se ha encontrado información detallada de los planos de fabricación para dicho artículo por motivos de seguridad y confidencialidad.

Este tipo de munición está compuesta de dos partes, un núcleo interior y un recubrimiento. Se han obviado otros componentes de las municiones que no son de interés para esta investigación, como puede ser el casquillo, la pólvora, etc...



*Ilustración 30. Diseño final de la bala de 7,62x51 OTAN M80*

### A.2.1.1.1. Diseñodelnúcleo

Para el diseño del núcleo se ha partido de la base de considerar un diámetro máximo para la bala de 7,62 mm. Puesto que el núcleo ha sido el primer elemento diseñado, y, se ha fijado el espesor del recubrimiento a 0,9 mm, el núcleo sólo puede presentar un diámetro de 5,82 mm. En lo respectivo a la longitud total de la bala se ha tomado como ejemplo la imagen de una bala de dicho calibre situada contiguamente a una regla de medición, de la que se extrae que la longitud de la bala es aproximadamente de unos 29 mm, por lo que se ha tomado dicho valor para su diseño.

El diseño del croquis se ha realizado según la perspectiva radial para posteriormente realizar una extrusión por revolución, la cual es muy adecuada para sólidos con geometrías cilíndricas o esféricas. Los pasos seguidos para la definición del croquis han sido los siguientes:

1. Generación de una línea de 2.91 mm desde el origen, la cual es la base del núcleo.
2. Creación de una línea constructiva vertical y coincidente a la línea creada en el paso anterior.
3. Creación de una spline. El primer tramo es tangente a la línea constructiva y presenta un punto coincidente a dicha línea a 11.24 mm de distancia de la base. Posteriormente la forma de la spline

se ha modelado manualmente y se ha hecho coincidir de forma tangente con la punta del núcleo.

4. Se ha generado una línea vertical desde el origen y de 28,5 mm de longitud, en cuyo final se ha dibujado un círculo de 1 mm de diámetro, a partir del cual se ha generado la geometría de la punta del núcleo. Una vez creada la tangencia con la spline, se han eliminado las partes sobrantes hasta dejar un arco de 0,72 mm de radio.
5. Mediante la Operación “Revolución de saliente/base” se ha generado la extrusión del sólido por revolución 360° tomando como eje la línea central creada en el punto anterior.

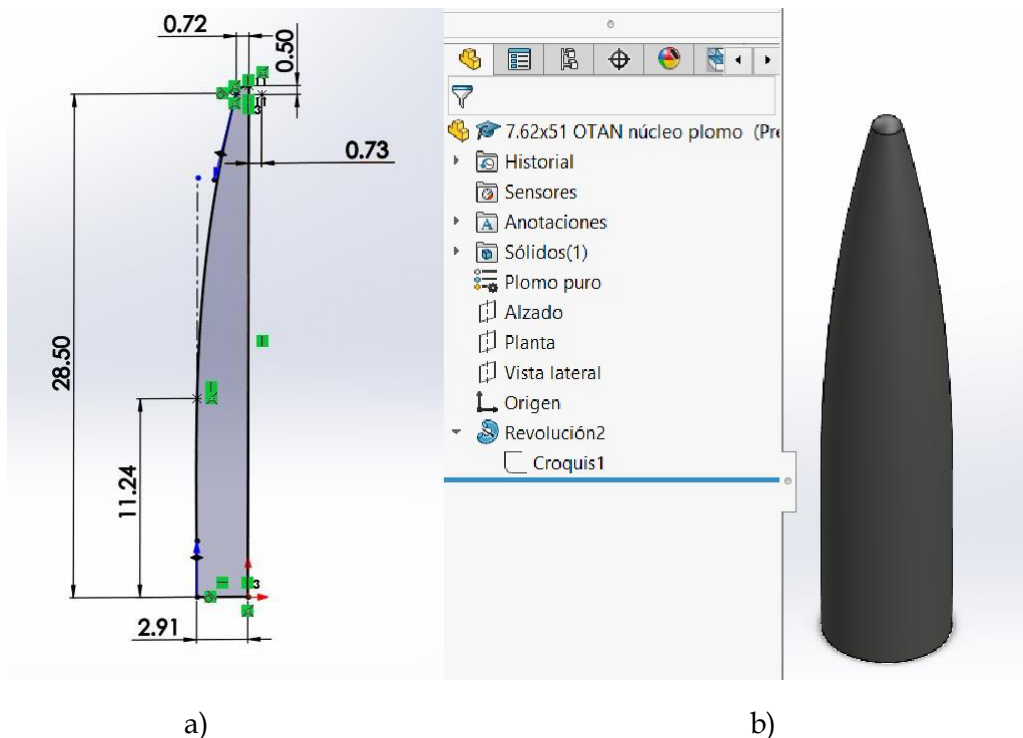


Ilustración 31. Croquis y diseño final del núcleo de la munición de 7,62x51 OTAN M80

En la imagen a) se aprecian las dimensiones y la geometría del croquis, que suponen las etapas iniciales del proceso de diseño. En la imagen b) se muestra el diseño final del componente de la munición.

### A.2.1.1.2. Diseño del recubrimiento

Para el diseño del recubrimiento se ha partido de la base del diseño del apartado anterior, A.1.1.1.1. Habitualmente, el espesor del recubrimiento oscila entre el 6% y el 8% del diámetro, pero se ha fijado a 0,9 mm, es decir, un 11% del diámetro, cuyo objetivo pretendía facilitar la labor de diseño al manejar una magnitud más grande.

Al igual que en el apartado anterior, en este caso el diseño del croquis también se ha realizado desde la perspectiva radial para emplear la extrusión por revolución. Los pasos seguidos para la definición del croquis han sido los siguientes:

1. Crear un archivo de ensamblaje y abrir el diseño del apartado A.1.1.1.1.
2. Crear una nueva pieza y generar un croquis en vista de Perfil o Alzado.
3. Desde el croquis, pulsar sobre el relieve del diseño del núcleo y seleccionar las aristas correspondientes a la mitad del diseño hasta llegar al eje imaginario de simetría. Una vez realizado, usar la herramienta "Convertir entidades". De esta forma, dispondremos de un croquis exacto de la superficie exterior del núcleo, la cual es la misma que la superficie interior del recubrimiento.
4. Una vez terminado el paso anterior, se han dibujado 2 líneas de 0,9 mm, una desde la punta de la bala y hacia arriba y otra desde la base de la bala y hacia abajo. De esta forma, desde los extremos de las líneas ya tenemos los puntos a partir de los que nace la superficie exterior. Desde la base procederemos a dibujar una línea horizontal paralela a la parte interior de la base y una posterior línea vertical que equidista 0,9 mm de la pared interior.
5. Siguiendo los últimos pasos del punto anterior, se ha creado una línea vertical constructiva, cuyo uso, al igual que en el apartado A.1.1.1.1., se ha destinado a guiar una spline mediante tangencia y posteriormente se ha modelado manualmente.
6. Desde la punta de la superficie interior se ha creado un círculo de 1,8 mm de diámetro y se ha creado la relación de tangencia con la spline. Las partes sobrantes se han eliminado y se ha empleado la herramienta "Definir croquis completamente" para acotar aquellas partes creadas manualmente.
7. Mediante la Operación "Revolución de saliente/base" se ha generado la extrusión del sólido por revolución 360° tomando como eje una de las líneas verticales de longitud 0,9 mm que se



encuentran en la parte central, es decir, en la base o en la punta del diseño.

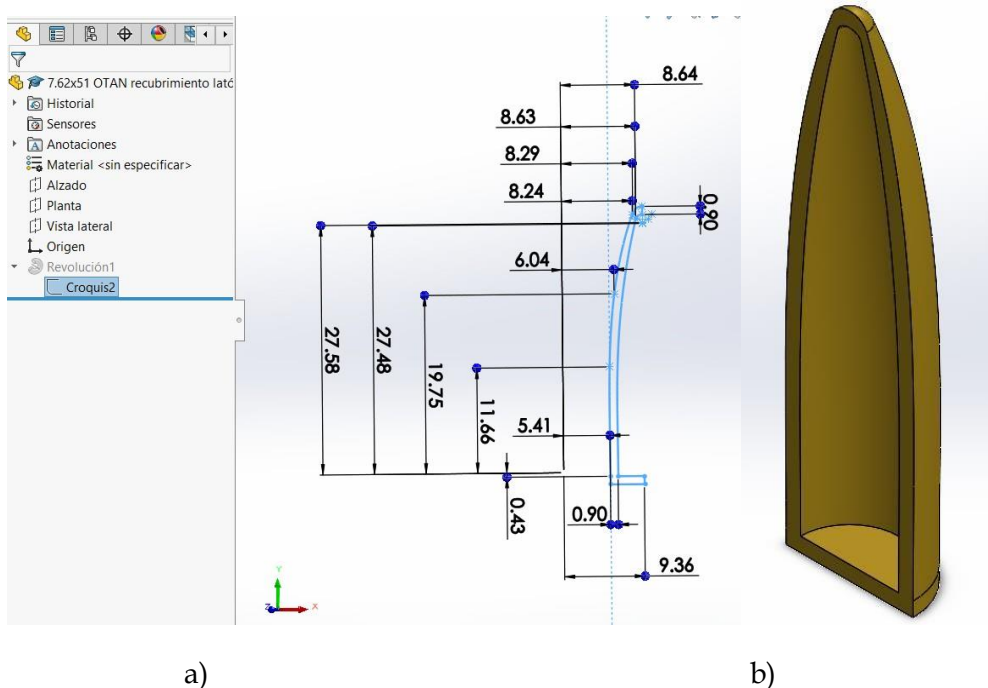


Ilustración 32. Croquis y diseño final del recubrimiento de la munición de 7,62x51 OTAN M80

En la imagen a) se aprecian las dimensiones y la geometría del croquis, que suponen las etapas iniciales del proceso de diseño. En la imagen b) se muestra el diseño final del componente de la munición.

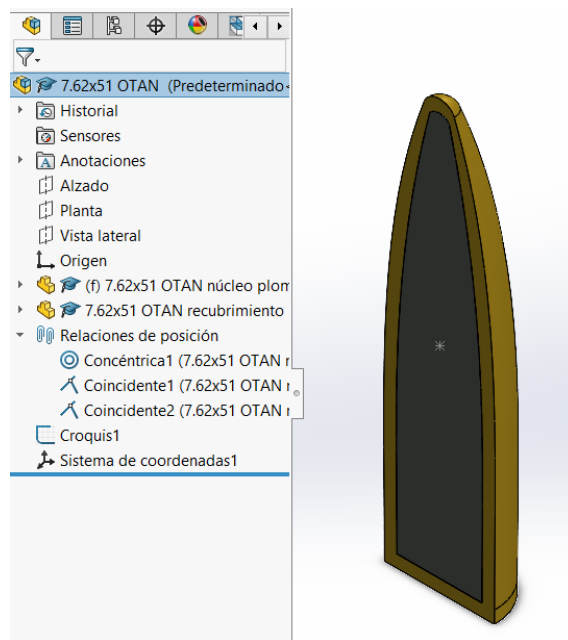
### A.2.1.1.3. Ensamblaje final de los componentes de la bala

Una vez se han generado las dos piezas de la bala, se han creado las relaciones de posición en el ensamblaje para crear la unión física de ambas partes.

Para ello, se han seguido los siguientes pasos:

1. Crear una relación de coincidencia entre los planos de Alzado de ambas piezas, de forma que no se genere rotación entre dichas piezas.
2. Crear una relación de concentricidad entre los contornos cilíndricos de la base de cada pieza

3. Crear una relación de coincidencia entre parte interior de la base de la pieza de recubrimiento y la parte exterior de la base de la pieza del núcleo.



*Ilustración 33. Vista de sección del ensamblaje de los componentes la munición de 7,62x51 OTAN M80*

#### A.2.1.1.4. Diseño simplificado de la munición

Tal y como se justificará en el apartado A.4.2.2., los requisitos de capacidad de computación para la simulación de modelos dinámicos son muy exigentes, por lo que, finalmente, se ha optado por simplificar el diseño final del apartado A.1.1.1.3. para los cálculos de las simulaciones dinámicas converjan antes en una solución semejante a la realidad.

Los pasos que se han seguido han sido los siguientes:

1. Suprimir el recubrimiento de la bala, limitando así la colisión de un solo cuerpo contra el chaleco.
2. Sustituir la spline que genera la curvatura de la bala por una línea recta vertical de 25,86 mm.

3. Crear otra línea vertical paralela a la del paso anterior, pero esta vez generada desde el origen, el cual se encuentra en el centro de la base del núcleo de la bala.
4. Crear un círculo de 2,91 mm de radio y eliminar las partes sobrantes. De esta forma solo queda intacto el primer cuadrante, el cual intersección con la línea recta y genera la curva.
5. Finalizando con la Operación “Revolución de saliente/base” se ha obtenido el diseño de un núcleo con una geometría de la punta mucho más suavizada.

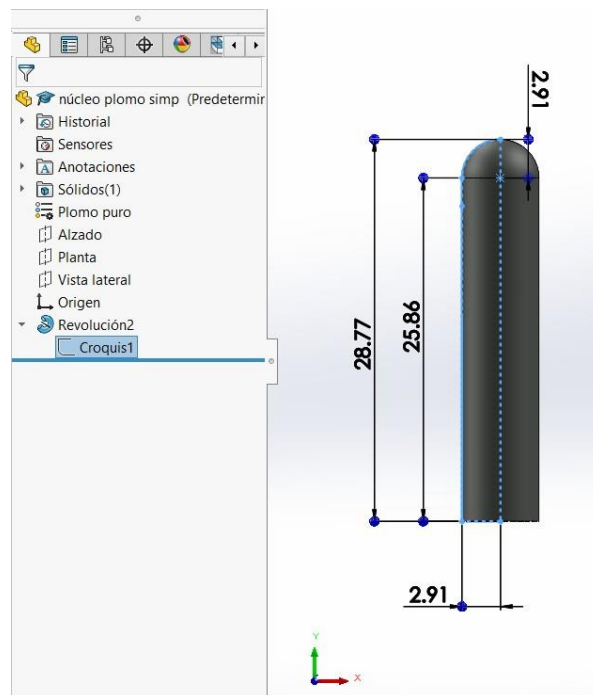


Ilustración 34. Diseño final simplificado de la munición

### A.2.1.2. Diseño del chaleco

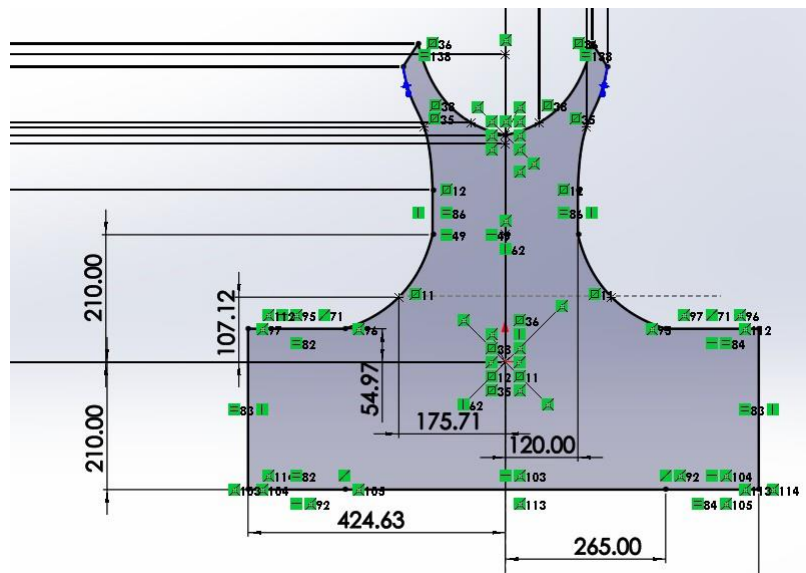
El diseño del chaleco se ha inspirado en la información aportada en el apartado I.4., además de las actuales opciones comerciales que pueden adquirirse en el mercado con el motivo de dotar del máximo realismo y crear un diseño que resulte competitivo comercialmente y sea viable su fabricación.

### A.2.1.2.1. Diseño del blindaje flexible

Para realizar el diseño del blindaje flexible se han realizado medidas reales con un metro de costura sobre el cuerpo de un modelo para tomar valores aproximados de las medidas principales de un chaleco.

Una vez realizadas las mediciones, se han seguido los siguientes pasos en el software de diseño CAD:

1. Creación del croquis mostrado en la Ilustración 35. La geometría de la parte superior del torso se ha creado teniendo en cuenta la posterior aplicación de la herramienta de “Flexionar”.
2. Extrusión del croquis con un espesor determinado mediante la herramienta “Extruir saliente/base”. Por ejemplo, en este caso se ha configurado un valor de 11 mm.



*Ilustración 35. Croquis del blindaje flexible.*

3. Empleo de la herramienta “Flexionar” en dos pasos consecutivos:
  - a. Inicialmente, se ha generado una primera flexión del chaleco por la zona pectoral para simular la curvatura que adopta el tejido en contacto con el torso humano. Para ello, se han configurado los planos de recorte 1 y 2 a las distancias del eje de referencia mostradas en la figura X. El ángulo de flexión ha sido de 45°.

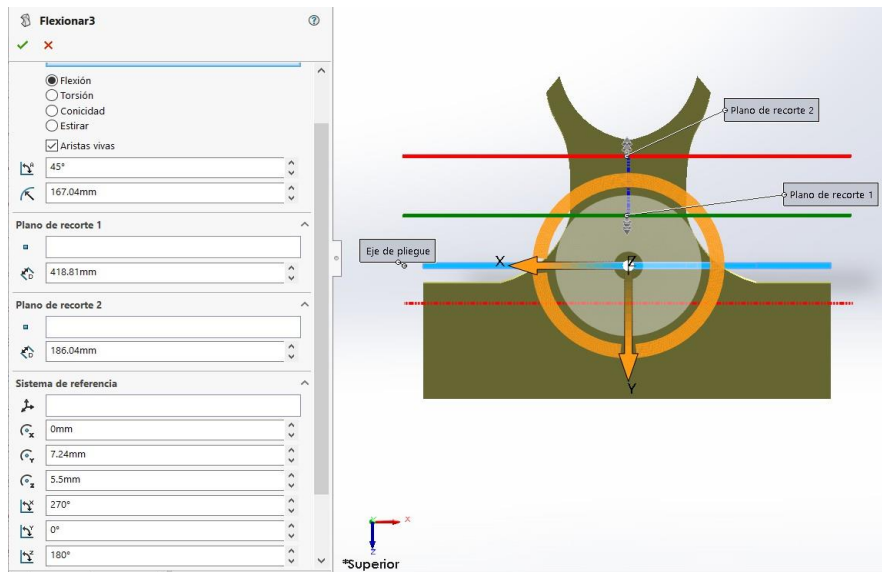


Ilustración 36. Parámetros configurados para la flexión del diseño por la zona pectoral.

- b. Posteriormente, se ha generado una segunda flexión del chaleco por la zona costal para simular la curvatura de los laterales, que protegen las costillas y sirven de zona de cierre mediante la unión con los laterales de la parte posterior del chaleco. Para ello, se han configurado los planos de recorte 1 y 2 a las distancias del eje de referencia mostradas en la figura X. El ángulo de flexión ha sido de  $135^{\circ}$ .

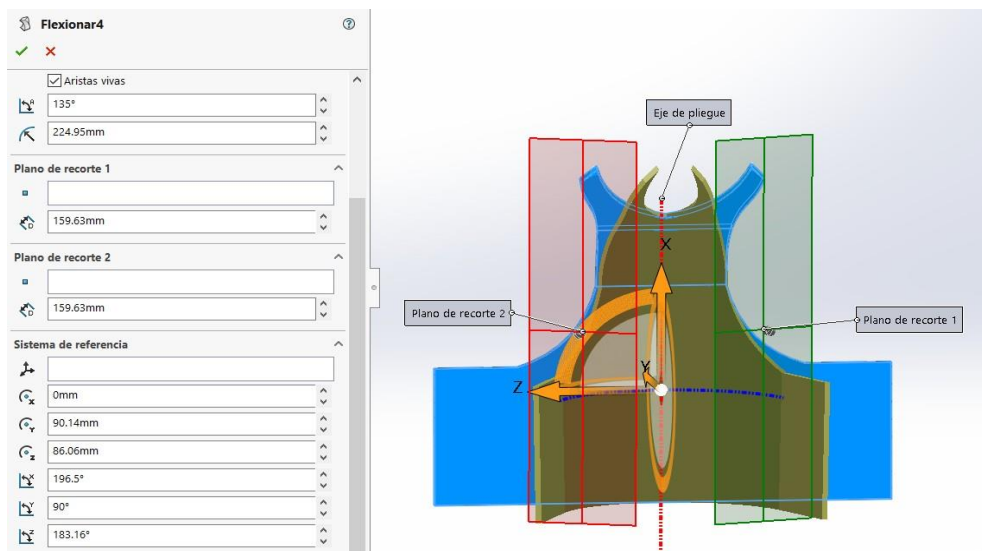


Ilustración 37. Parámetros configurados para la flexión del diseño por la zona costal.



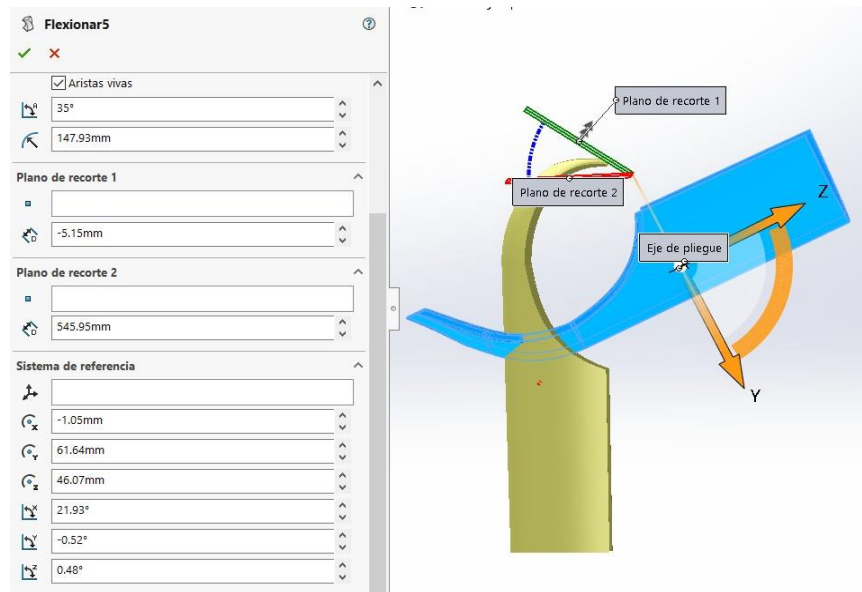


Ilustración 39. Parámetros configurados para la flexión del diseño por la zona del pectoral superior-trapecio

7. Finalmente, se ha aplicado un efecto de apariencia para distinguir con mayor facilidad los sólidos del diseño entre ellos. Se ha escogido la categoría de apariencia para materiales compuestos, y, en especial, el efecto de “Tela de aramida de fibra de carbono”. Aunque el material usado no sea exactamente el mismo, el efecto de laminado con fibras orientadas crea una imagen muy similar a la de la realidad.

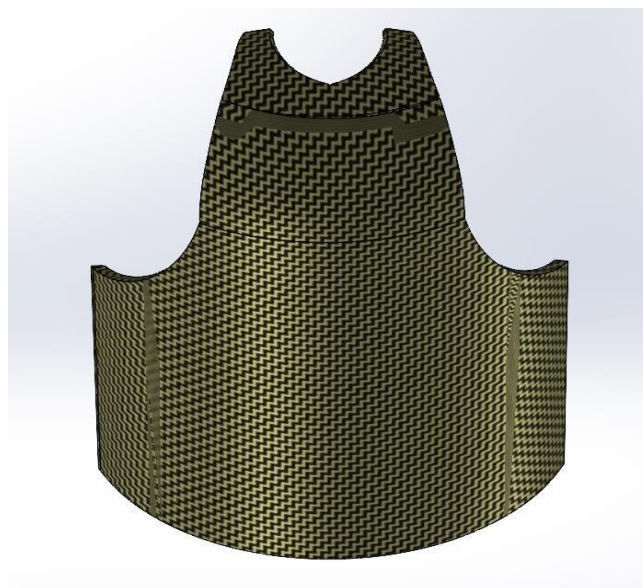


Ilustración 40. Diseño final del blindaje flexible

### A.2.1.2.2. Diseño del blindaje rígido

El diseño del blindaje rígido, es decir, la placa de refuerzo, ha pretendido imitar las opciones comercializadas en la actualidad. Las dimensiones principales han sido tomadas de un producto comercializado por el fabricante Militech, que posee placas rígidas para protección personal.

Con tal de ofrecer una mayor protección, se ha optado por escoger la opción de tamaño L, que suelen presentar unas dimensiones de 337 x 260 mm. El espesor se ha tomado como un parámetro variable para comprobar posteriormente, mediante la simulación, a partir de qué valores se consigue cumplir con la normativa explicada en el apartado III.1.

Por otra parte, en lo respectivo al diseño, los chaflanes se han estimado a simple vista debido a la falta de información sobre el conjunto de medidas de este tipo de productos.



*Ilustración 41. Placa SAPI de la marca Militech de tamaño con L con sus dimensiones principales*

El diseño se ha realizado con el software SolidWorks y se han seguido los siguientes pasos para obtener la pieza mostrada en la Ilustración 44:

1. Creación de un croquis en la vista de Alzado y trazado de un rectángulo de dimensiones 337 x 260 mm



- Desde el croquis, uso de la herramienta “Chaflán de croquis”. Se ha configurado con la opción “Ángulo-Distancia” y los valores 50 mm, para la distancia, y  $45^\circ$ , para el ángulo.

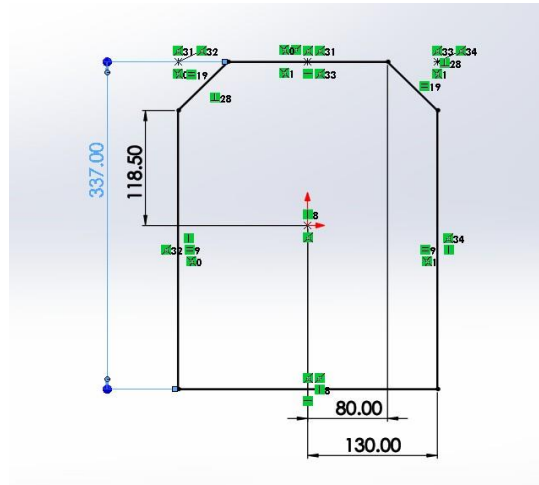


Ilustración 42. Croquis del blindaje rígido

- Empleo de la herramienta “Extruir saliente/base” y configuración del espesor deseado. En este caso se ha configurado un valor de 8 mm.
- Uso de la herramienta “Flexionar” configurada con un radio de 224,95 mm. El valor del radio de flexión es el mismo que se ha generado en el paso 3.b del apartado A.1.1.2.1. con el fin de que las superficies de contacto encajen. Los planos de recorte se han situado de forma paralela y coincidentemente a las caras laterales y el eje de pliegue está situado por la mitad vertical del sólido. Ver Ilustración 43.

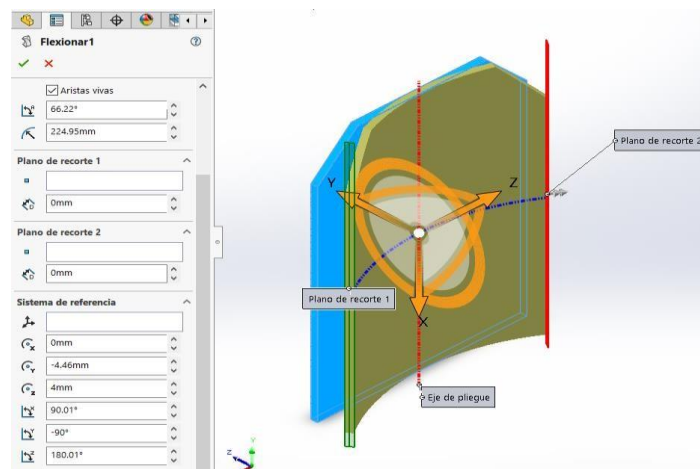
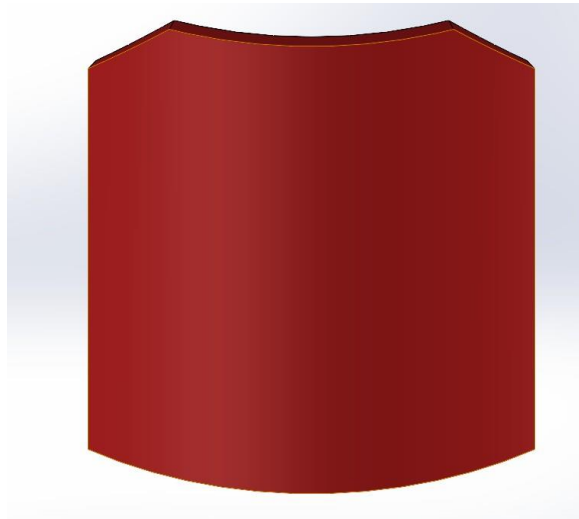


Ilustración 43. Parámetros configurados para la flexión de la placa de refuerzo



*Ilustración 44. Diseño final del blindaje rígido.*

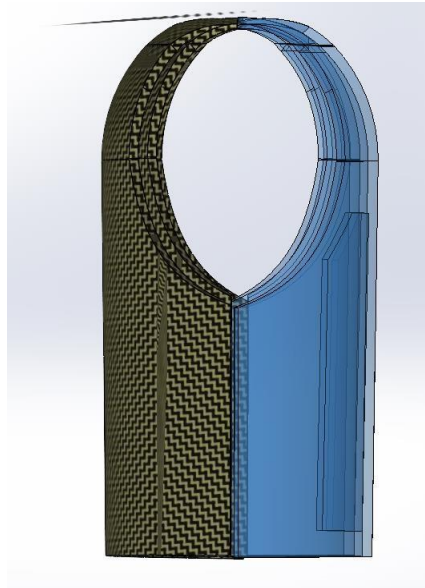
### A.2.1.2.3. Ensamblaje de los componentes del chaleco

Los pasos realizados para ensamblar los componentes del chaleco antibalas han sido:

1. Inserción de componentes. Se han incorporado al espacio de ensamblado dos unidades del componente de blindaje flexible, es decir, el laminado de fibra, y una unidad del componente de blindaje rígido, en otras palabras, la placa de refuerzo.
2. Generación de relaciones de posición:
  - a. Con tal de alinear el blindaje rígido con el blindaje flexible, se ha creado una relación de paralelismo entre los planos de Vista lateral de ambas piezas.
  - b. Con tal de alinear los componentes de blindaje flexible, se ha generado una relación de coincidencia entre los planos de Planta de ambas piezas.
  - c. La unión final del blindaje rígido con la capa frontal de blindaje flexible se ha realizado manualmente, respetando siempre la tangencia y evitando la colisión de las superficies, para después aplicar una restricción de fijación.
  - d. La unión final del blindaje flexible posterior con el blindaje rígido se ha realizado mediante una relación de Distancia entre los planos de Alzado de ambas piezas de 20 mm (correspondiente a los espesores de 8 mm del blindaje

rígido + 11 mm del blindaje flexible frontal + 1 mm de holgura)

3. Mediante la herramienta “Simetría de componentes”, se ha generado una copia de los tres primeros elementos ensamblados con respecto al plano de simetría de una de las caras planas de la parte que protege la zona costal del diseño. Ver Ilustración 45.



*Ilustración 45. Aplicación de la simetría de componentes durante el ensamblado del chaleco completo.*

Finalmente, el diseño definitivo del chaleco antibalas tiene el aspecto mostrado en la Tal y como se muestra en la imagen, la prenda de protección no presenta elementos de cierre como velcros, bordados, etc... Este tipo de elementos de unión se ha omitido para simplificar el diseño, sin embargo, se valora oportuno incorporar una unión por dicho sistema de cierre de gancho y bucle en los laterales.



Ilustración 46. Diseño final del conjunto del chaleco ensamblado

En la Ilustración 47 se muestra una vista de sección que divide el ensamblaje por la mitad (corte por la mitad del cuello del chaleco). Se aprecia la composición total de cada componente, es decir, las 2 placas de refuerzo encerradas entre dos laminados de fibra cada una, dando un total de 4 laminados de fibra de características idénticas, todos ellos con unos espesores finales por determinar durante la simulación FEM.

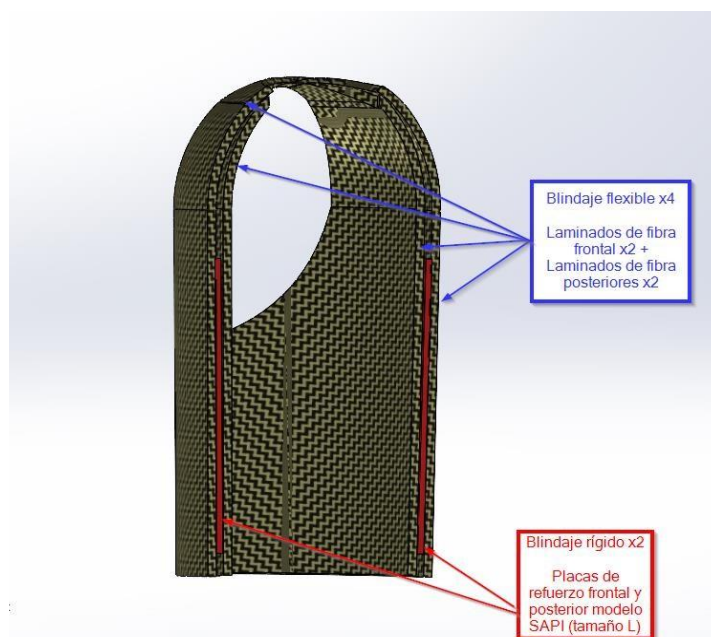


Ilustración 47. Vista de sección del diseño final del conjunto del chaleco ensamblado

### A.2.2. Diseños simplificados

Este apartado comprende el conjunto de diseños que se han desarrollado con motivo de las múltiples complicaciones encontradas y la necesidad de aportar diseños más simples para alguna etapa del desarrollo de este TFG, en concreto durante la fase de simulaciones FEM.

#### A.2.2.1. Diseño para la simulación dinámica con material ortotrópico

La simulación con configuración de material con propiedades ortotrópicas requiere de un diseño en formato plano si se quiere aprovechar el módulo de laminados compuestos ACP (Pre), el cual siempre trabaja con superficies planas. Por lo tanto, el diseño simplificado se ha adaptado a este criterio de la siguiente forma:

1. Se ha creado un croquis en la vista Alzado de un círculo de 100 mm. Las dimensiones del círculo han tomado dicho valor para cumplir que, al menos, la sección del chaleco analizada fuera 10 veces mayor al diámetro de la bala, de forma que la sección sea lo suficientemente grande como para que no se pierda información sobre las tensiones y deformaciones tras la colisión.
2. Seleccionando el croquis del círculo se ha empleado la herramienta "Superficie plana", tomando el croquis para el campo de "Entidades limitantes", generando así un círculo plano de las dimensiones indicadas.
3. Se ha creado un ensamblaje con el diseño generado en el punto anterior y el comentado en el apartado A.1.1.1.4.
4. Desde el ensamblaje se han generado las siguientes relaciones: relación de coincidencia entre el punto central del círculo plano y el origen de coordenadas, relación de distancia de 60 mm entre la superficie plana y la base de la bala, y una relación de paralelismo entre la superficie plana y la cara de la base de la bala.
5. Para centrar la bala en el círculo de 100 mm se ha situado la vista centrada al Alzado y se ha situado manualmente de forma aproximada en el centro, puesto que no se requiere especial precisión en este aspecto con relación a los resultados de la simulación.

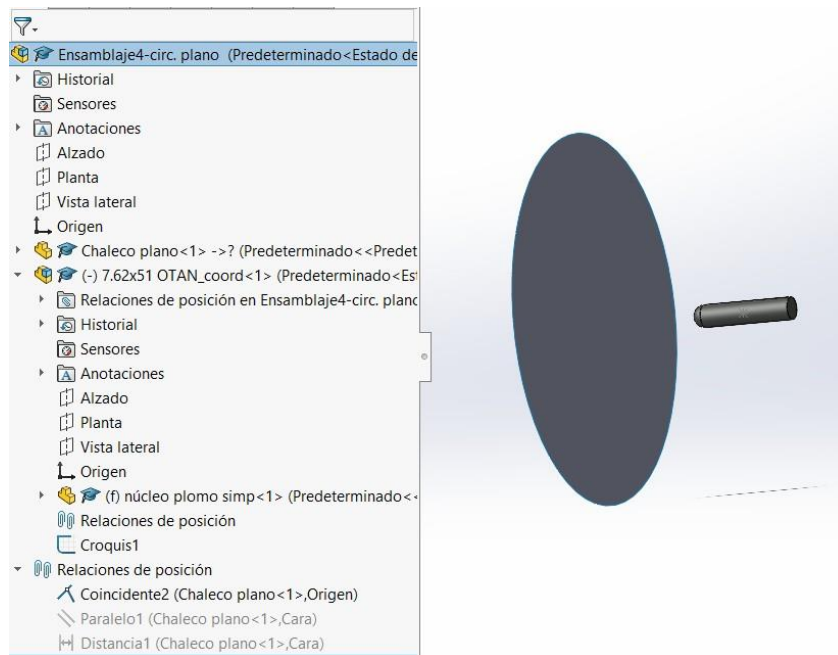


Ilustración 48. Diseño final simplificado para la simulación dinámica con materiales ortotrópicos

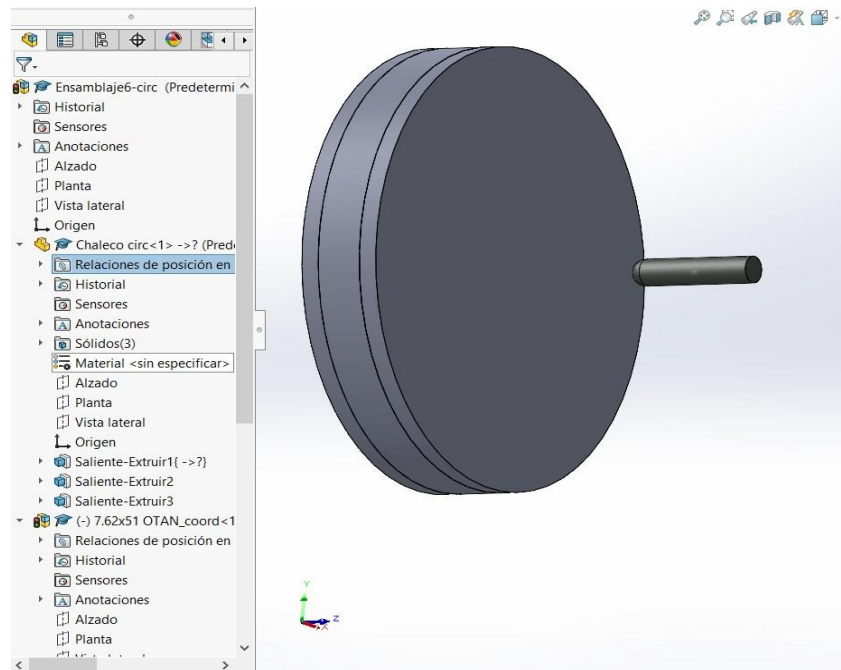
### A.2.2.2. Diseño para la simulación dinámica con materiales isotrópicos

El diseño para este apartado presenta ciertas similitudes con el del apartado A.2.2.1. La principal diferencia reside en que el espesor para las simulaciones de este tipo se ha modificado en el origen del diseño y no en la configuración del software de simulación, como bien se ha hecho en las simulaciones dinámicas con materiales ortotrópicos.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. En primer lugar, el diseño del croquis es igual al del apartado A.2.2.1. Ver punto 1.
2. Partiendo del croquis, se ha empleado la herramienta “Extruir saliente/base” y se ha generado un sólido de, por ejemplo, 10 mm de espesor desde el plano de croquis y en la dirección del plano medio. Este primer sólido será el que tendrá la función de refuerzo balístico.

3. Pulsando sobre la cara frontal del sólido extruido en el paso anterior, se procederá a crear un nuevo croquis. Posteriormente, pulsando sobre cualquier arista del cilindro y usando la herramienta "Convertir entidades", tendremos el croquis del sólido frontal. Finalmente, usando la herramienta "Extruir saliente/base", se generará un sólido de, por ejemplo, 4 mm de espesor desde el plano de croquis y con la opción "Dirección 1" de "Hasta profundidad especificada" (en el sentido positivo del eje X).
4. Para el sólido posterior se procederá de igual manera que el paso anterior, pero creando el croquis en la cara posterior del sólido del paso 2. Posteriormente, se procederá de la misma forma, pero generando la extrusión en el sentido negativo del eje X.
5. Se ha creado un ensamblaje con el diseño generado en este apartado y el del apartado A.1.1.1.4.
6. La generación de las relaciones se ha realizado de forma muy idéntica a lo comentado en el paso 4 del apartado A.1.2.1. Las diferencias fundamentales son que, para relacionar el chaleco con la bala, se toma como referencia la superficie del sólido frontal tanto para el paralelismo como para la distancia y, para la relación de coincidencia entre planos de Alzado se toma el Alzado del sólido central.
7. Para centrar la bala, se realiza de igual manera a lo expuesto en el paso 5 del apartado A.1.2.1.



*Ilustración 49. Diseño final simplificado para la simulación dinámica con materiales isotrópicos*

### A.2.2.3. Diseño para las simulaciones estáticas

El concepto de diseño para las simulaciones estáticas consiste únicamente en el diseño de los sólidos que componen el chaleco. Para este caso se suprime el sólido de la bala debido a que es sustituida por la aplicación de una fuerza de magnitud equivalente al impacto de un proyectil a una determinada velocidad.

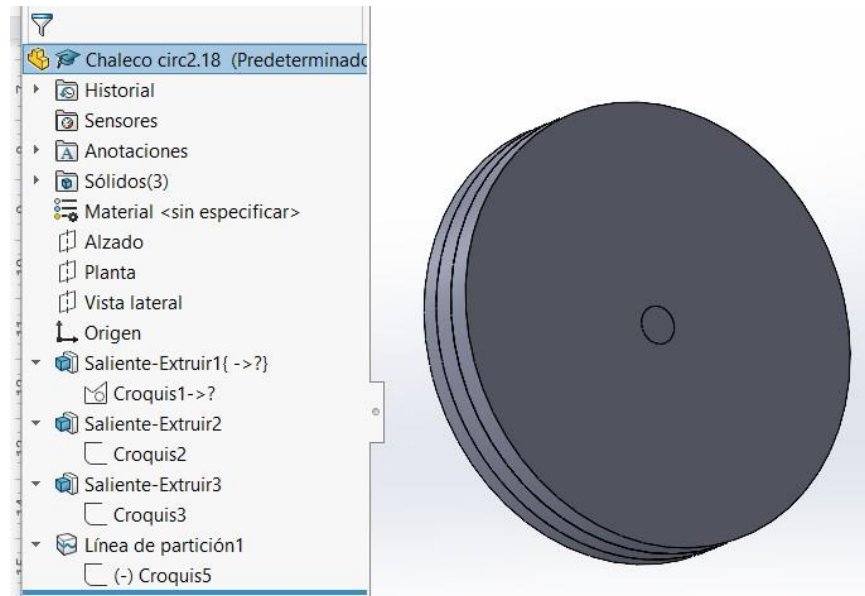
En esencia el diseño es idéntico al del apartado A.2.2.2., con la salvedad que, como se acaba de mencionar, se suprime la bala; y, de forma adicional al paso 7 del apartado A.2.2.2., se añade la proyección de un círculo sobre la cara del sólido frontal que servirá para aplicar una fuerza uniformemente repartida con el área del diámetro de la bala.

La secuencia realizada para añadir el paso adicional es:

1. Sobre la cara del sólido frontal, se ha creado un croquis. Se ha dibujado en el centro un círculo de diámetro igual al calibre de la bala (7,62 mm).



2. Mediante la herramienta “Línea de partición” se ha proyectado el croquis creado en el apartado anterior sobre la cara frontal del sólido situado en primer lugar.



*Ilustración 50. Diseño final simplificado para la simulación estática*



## A3. Cálculos

Para calcular la fuerza equivalente a la energía de un proyectil al impactar (ver apartado A.4.2.4. para entrar en contexto), se han tenido en cuenta algunos requisitos de la norma que suponen valores de entrada como pueden ser la masa de la munición (para un calibre 7,62x51 OTAN,  $m = 9,6 \text{ g} = 0,0096 \text{ kg}$ ) y su velocidad tras el disparo (en este caso,  $v = 847 \text{ m/s}$ ).

Los datos relativos a los instantes de tiempo obtenidos en el Apartado A.3.1.1. son:  $t_0 = 3,9204 * 10^{-5} \text{ s}$ ,  $t_x = 7,0491 * 10^{-5} \text{ s}$ . Para dichos instantes de tiempo se sabe que  $v_0 = 847 \text{ m/s}$  y  $v_x = 0 \text{ m/s}$

De esta forma tenemos que:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_x - v_0}{t_x - t_0}$$

$$a = \frac{0 - 847}{(7,0491 - 3,9204) * 10^{-5}} = -2,7072 * 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = m \frac{dv}{dt} = m * a$$

$$F = 0.0096 * (-2,7072 * 10^7) = -2,5989 * 10^5 \text{ N}$$

Para el cálculo de la masa total del chaleco (laminado de fibra+placas de refuerzo) se conocen los siguientes datos:  $A_r = 0,08512 \text{ m}^2$ ,  $A_c = 0,214958 \text{ m}^2$ ,  $\rho_{Ac} = 7792 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $\rho_B = 2505 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $\rho_{Ke} = 1450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $\rho_{PE} = 980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Siendo  $A_r$  el área superficial del refuerzo,  $A_c$  el área superficial del laminado,  $\rho_{Ac}$  la densidad del Acero Armox Advance,  $\rho_B$  la densidad del Carburo de Boro,  $\rho_{Ke}$  la densidad del Kevlar y  $\rho_{PE}$  la densidad del UHMWPE.

Con los datos anteriores y la fórmula de la densidad se han realizado los cálculos de la masa en función de los espesores de laminados y de refuerzo:

$$\rho = \frac{m}{V}; m = \rho * V$$

$$m_{total} = 2 * \Sigma(\rho_x * A_x * e_x)$$

Por ejemplo, para el caso de una configuración de 3 capas formadas por UHMWPE + Carburo de Boro +UHMWPE con espesores en mm de 6, 5 y 6, respectivamente, el cálculo quedaría de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}m_{total} &= 2 * [(\rho_{PE} * A_c * e_x) + (\rho_B * A_r * e_x) + (\rho_{PE} * A_c * e_x)] = \\ &= 2 * [(980 * 0,214958 * 6 * 10^{-3}) + (2505 * 0,08512 * 5 * 10^{-3}) \\ &\quad + (980 * 0,214958 * 6 * 10^{-3})] = 7,19 \text{ kg}\end{aligned}$$

## A4. Desarrollo

En este apartado se recoge el desarrollo realizado para la creación de un modelo de simulación, desde los inicios para su configuración hasta los resultados finales.

### A.4.1. Estudio y definición de estados tensionales

En este apartado se estiman los parámetros mecánicos (tensiones, fuerzas, etc..) que representarán una entrada en el modelo FEM. Más adelante, en el apartado A.4.2., se justificará qué modelo se ha escogido y por qué, para el análisis que se ha realizado; sin embargo, resulta interesante realizar un adelanto para comprender la información de este apartado.

Para entrar en contexto, el modelo finalmente implementado ha sido uno de tipo estático, es decir, el sistema se mantiene invariable o en equilibrio independientemente del tiempo. Eso no implica que las variaciones en el ambiente no afectan al sistema, sin embargo, su comportamiento no depende del instante de tiempo y los valores de salida siempre dependen de la función y los valores de entrada. Sin embargo, cabe destacar que, dado que se pretendía presentar un modelo dinámico, se tienen ciertos datos y resultados que se han aprovechado para determinados apartados del proyecto, como puede ser el apartado A.4.1.1.

Para este modelo estático solo se ha requerido una variable de entrada, que será una fuerza de magnitud equivalente a la energía de un impacto de bala según las condiciones establecidas en la normativa NIJ 0101.06 para un ensayo P-BFS para certificación de protección de nivel III.

Las fórmulas base con las que estimaremos la fuerza son: la Segunda Ley de Newton, para un cuerpo con masa constante, y la ecuación diferencial de la aceleración. Mediante la ecuación diferencial calcularemos una aceleración en base a la velocidad ya conocida y una diferencia de tiempo que se ha calculado experimentalmente. Dicha aceleración formará parte de la ecuación de la Segunda Ley de Newton junto con la masa ya conocida para obtener una fuerza “equivalente” a la energía de un impacto de bala.

### A.4.1.1 Cálculo experimental del tiempo hasta el impacto

Para poder calcular la fuerza necesaria para configurar la simulación se requieren datos de tiempo. En este apartado se ha aprovechado una simulación de prueba realizada para la obtención de un modelo dinámico bien configurado, el cual, como se justificará en el apartado A.4.2.1., no ha sido posible conseguir. Esta simulación ha permitido obtener datos experimentales de tiempo; sin embargo, se trata de una aproximación a la realidad, pues no se ha conseguido que el modelo simule perfectamente lo que ocurre en la realidad.

En la siguiente imagen se muestra una tabla de datos con los resultados de velocidad de la cara posterior de la bala (zona más próxima a la detonación de la pólvora) por instante de tiempo. Dado que el rango de tiempo que necesitamos conocer es el de deceleración de la bala, los instantes de tiempo que se han considerado son:

- Para el instante inicial se ha tomado el primer valor a partir del cual se observa una variación de la velocidad con respecto a la velocidad de referencia de la bala (847 m/s), tal y como se muestra en la Ilustración 51.
- Para el instante final se ha empleado el primer valor a partir del cual se observa un cambio de signo en la magnitud de la velocidad, es decir, el primer valor en el que se aprecia un cambio de deceleración a estado en reposo ( $v=0$ ), tal y como se muestra en la Ilustración 52.

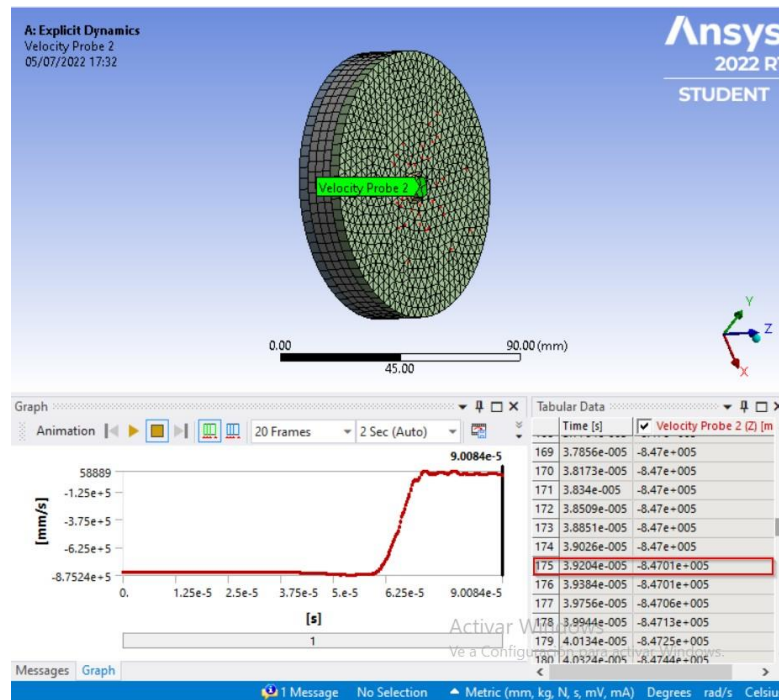


Ilustración 51. Imagen del modelo e instante inicial del contacto

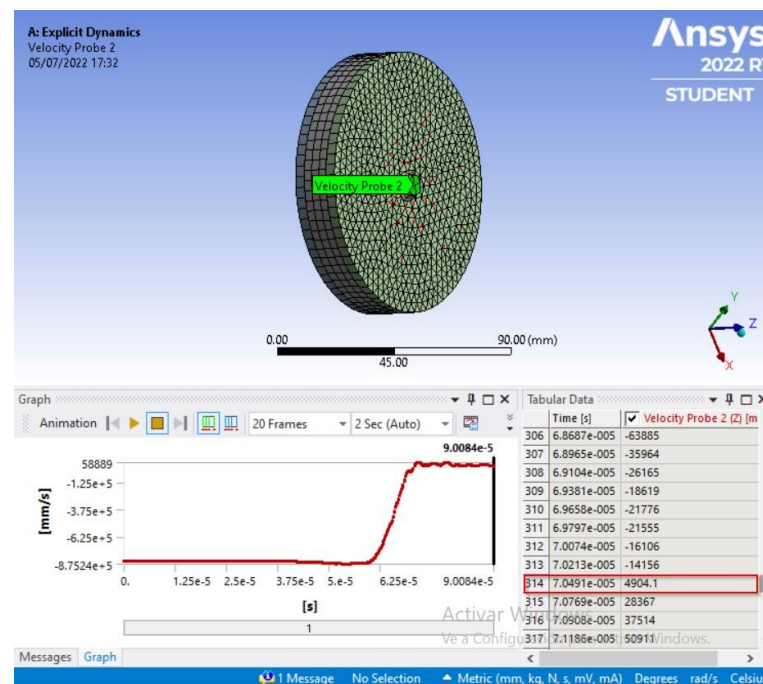


Ilustración 52. Imagen del modelo e instante final del contacto

Cabe destacar que los valores con signo positivo son inconsistencias del modelo que no se han podido pulir debido a la compleja configuración del modelo dinámico. Debido a que la variación de velocidad es muy pequeña

en el rango que la bala pasa de decelerar a acelerar en sentido positivo, se ha ignorado este hecho a modo de simplificación y se ha considerado que el valor final escogido corresponde a un instante de tiempo en el que la velocidad es la más próxima posible a 0 según el modelo ensayado.

### A.4.2 Simulación mediante FEM

En este apartado se ha realizado un estudio experimental mediante el Método de Elementos Finitos con la ayuda del software Workbench de Ansys, el cual tiene un gran abanico de opciones empleando la metodología FEM.

Cabe destacar la distinción entre los modelos dinámico y estático dentro del espectro de las simulaciones bajo esta metodología.

Por una parte, la simulación estática analiza las relaciones que se mantienen invariables con respecto del tiempo, mientras que una simulación dinámica lo hace con aquellas relaciones que sí dependen del tiempo. Además, la simulación estática carece de un historial interno dentro del sistema, pero hace uso de funciones cuyas salidas dependen únicamente de las variables de entrada. Por lo tanto, las simulaciones estáticas se utilizan para proporcionar una imagen general del resultado si se toma una determinada decisión.

Por otro lado, la simulación dinámica es aquella que hace uso de una memoria interna compuesta por entradas anteriores, variables internas y salidas. Las variables de estado determinan la memoria interna ya que tienen una tasa de cambio. Dicha tasa de cambio está formada por los valores actuales de las entradas al sistema. A diferencia de la simulación estática, el tiempo es una función clave para este caso y esto implica que se pueden obtener diferentes salidas. Por tanto, la simulación dinámica se utiliza para determinar el resultado de una determinada decisión en distintos momentos y situaciones.

Una vez se ha comprendido el alcance de cada tipología de simulación, se ha considerado que el objeto de demostración para este TFG requiere de un modelo dependiente del tiempo, ya que existen múltiples variables internas en el momento de una colisión entre dos objetos. Como posteriormente se observará, no ha sido posible realizar dicho análisis dinámico, por lo que se ha optado por simplificarlo a la imagen generalizada que puede ofrecer un modelo estático.

En lo respectivo a la aplicación de la norma expuesta en el apartado A.1.2.6., cabe destacar que, por capacidad de computación del sistema, se ha requerido simplificar la ejecución de la prueba de P-BFS al análisis de la deformación



posterior de un solo impacto de bala central y solamente ejecutado sobre conjuntos completos (blindaje flexible+blindaje rígido), si procede. Además, se ha omitido la aplicación del acondicionamiento y demás ensayos de condiciones ambientales.

### A.4.2.1. Modelo dinámico y dificultades encontradas.

El objetivo de este apartado es mostrar los caminos que se han seguido para la generación de un modelo dinámico, que, tal y como se justificará, no ha sido posible por múltiples motivos.

Para la confección de un modelo dinámico robusto y con una gran aproximación a la realidad, que era el objetivo en primera instancia, se requiere de muchos conocimientos técnicos sobre los softwares de simulación, y en este caso en concreto de la herramienta Workbench de Ansys. Por otra parte, los recursos gráficos y la memoria RAM del sistema también deben ser muy avanzados, de lo contrario, las simulaciones más simples con modelos dinámicos tenían una duración media de 3-4 horas sin llegar en muchas ocasiones a obtenerse un resultado y generarse errores de cálculo.

Los caminos que se han seguido para la generación del modelo dinámico han sido dos:

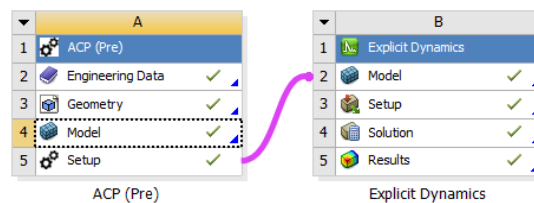
1. En primer lugar, se ha planteado la generación de un modelo dinámico con la configuración de material ortotrópico para el blindaje flexible, es decir, el laminado de fibra; mientras que, para el blindaje rígido, es decir, las placas de refuerzo, y la munición, se ha planteado su configuración como materiales isotrópicos.
2. En segundo lugar, se ha planteado la generación de un modelo dinámico con la configuración de materiales isotrópicos para todos los elementos.

### A.4.2.2. Modelado dinámico con estructura ortotrópica para el chaleco

Este apartado ha supuesto el primer intento de obtener una simulación realista para el comportamiento de un impacto de bala contra un conjunto blindaje flexible + blindaje rígido. La estructura de los materiales se ha

considerado de tipo ortotrópica para el blindaje flexible, ya que se ha tratado de un laminado de fibras orientadas en distintas direcciones, por lo que la resistencia del material depende en gran medida de las tensiones en cada componente del eje de referencia.

Para llegar a ello, en el módulo de Datos de Ingeniería se ha optado por realizar una configuración de tipo ortotrópica para los materiales de los blindajes flexibles y de tipo isotrópica para los materiales del blindaje rígido y de la munición. Por otra parte, se ha conectado el módulo ACP (Pre), que es la herramienta de diseño de laminados compuestos en Ansys, con el módulo de Explicit Dynamics, el cual permite realizar las simulaciones con modelos dinámicos.



*Ilustración 53. Conexión de los módulos ACP (Pre) con Explicit Dynamics.*

Tal y como se ha indicado, los materiales de los blindajes rígidos (Carburo de Boro y Acero AISI L2) se han configurado con un comportamiento isotrópico, el cual es perfectamente compatible con la realidad, puesto que sus propiedades son iguales en los componentes vectoriales de sus distintos planos 2D. Para ello se han agregado los módulos de Densidad, Elasticidad Isotrópica y Tensiones Principales a Rotura, tal y como se observa en la Ilustración 54.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7792	kg m <sup>-3</sup>		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulu...			
6	Young's Modulus	209	GPa		
7	Poisson's Ratio	0.29			
8	Bulk Modulus	1.6587E+11	Pa		
9	Shear Modulus	8.1008E+10	Pa		
10	Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	473.5	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>		
11	Principal Stress Failure				
12	Maximum Tensile Stress	2000	MPa		
13	Maximum Shear Stress	1200	MPa		

Ilustración 54. Ejemplo de configuración para material isotrópico. Caso del acero Armox Advance.

En el caso de los materiales para los blindajes flexibles (Kevlar y UHMWPE) se han configurado con un comportamiento ortotrópico, y para ello se han empleado los módulos de Densidad, Elasticidad Ortotrópica, Tensiones Límite Ortotrópicas, y Calor Específico.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	0.98	g cm <sup>-3</sup>		
4	Orthotropic Elasticity				
5	Young's Modulus X direction	3.62	GPa		
6	Young's Modulus Y direction	5.11	GPa		
7	Young's Modulus Z direction	5.11	GPa		
8	Poisson's Ratio XY	0.013			
9	Poisson's Ratio YZ	0			
10	Poisson's Ratio XZ	0.5			
11	Shear Modulus XY	2	GPa		
12	Shear Modulus YZ	0.192	GPa		
13	Shear Modulus XZ	2	GPa		
14	Bilinear-Isotropic Hardening			<input checked="" type="checkbox"/>	
17	Hill Yield Criterion			<input checked="" type="checkbox"/>	
18	Separated Hill Potentials for Plasticity and Creep	No			
19	Yield stress ratio in X direction	0.03			
20	Yield stress ratio in Y direction	1E-05			
21	Yield stress ratio in Z direction	1E-05			
22	Yield stress ratio in XY direction	1E-06			
23	Yield stress ratio in YZ direction	1E-06			
24	Yield stress ratio in XZ direction	1E-06			
25	Orthotropic Stress Limits				
26	Tensile X direction	753	MPa		
27	Tensile Y direction	753	MPa		
28	Tensile Z direction	1.07	MPa		
29	Compressive X direction	-753	MPa		
30	Compressive Y direction	-753	MPa		
31	Compressive Z direction	-1.07	MPa		
32	Shear XY	60	MPa		
33	Shear YZ	35	MPa		
34	Shear XZ	60	MPa		
35	Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	1850	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>		

Ilustración 55. Ejemplo de configuración para material ortotrópico. Caso del UHMWPE.

Dado que con los datos que se disponía no ha sido posible encontrar un módulo de plasticidad compatible con el de Elasticidad Ortotrópica, posteriormente fue sustituido por el de Elasticidad Anisotrópica, el cual es

compatible con el Criterio de Fallo de Hill y permite una mayor flexibilidad, pudiéndose adaptar a las condiciones ortotrópicas. Con tal de poder configurar correctamente dicho módulo, se requería obtener la matriz de rigidez o la de elasticidad. Para ello, se calcularon las constantes y se completó la tabla de la Ilustración 56 con los valores obtenidos en los componentes de la mitad superior de la matriz de la Ilustración 57.

Table of Properties Row 11: Anisotropic Elasticity						
	A	B	C	D	E	F
1	D[*],1 (Pa) ▼	D[*],2 (Pa) ▼	D[*],3 (Pa) ▼	D[*],4 (Pa) ▼	D[*],5 (Pa) ▼	D[*],6 (Pa) ▼
2	D11					
3	D21	D22				
4	D31	D32	D33			
5	D41	D42	D43	D44		
6	D51	D52	D53	D54	D55	
7	D61	D62	D63	D64	D65	D66

Ilustración 56. Tabla para la configuración de la matriz de rigidez en materiales anisotrópicos.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Ilustración 57. Imagen de la matriz de rigidez simplificada para materiales ortotrópicos.

Posteriormente, se ha configurado el módulo de diseño de laminados compuestos de Ansys, ACP (Pre), el cual permitía generar una estructura compuesta en la que se podía indicar el orden de los materiales, la orientación de las fibras y el espesor de las capas de los laminados.

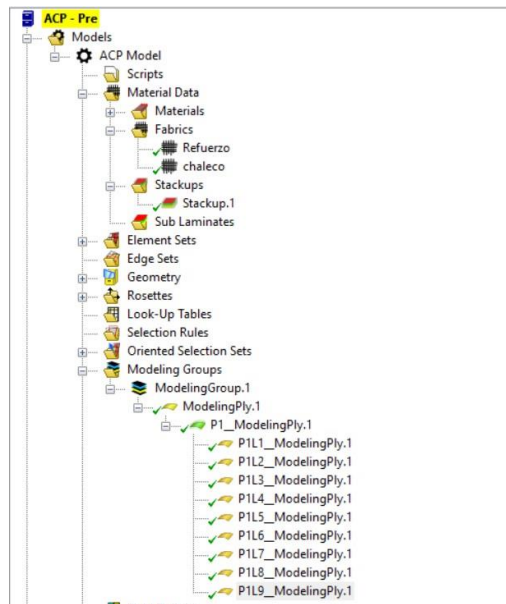


Ilustración 58. Árbol de configuración del módulo ACP (Pre)

El diseño final ha consistido en un laminado de 4 capas frontal, seguido de un refuerzo de acero y un laminado de 4 capas posterior. Cada capa ha sido configurada con un espesor de 1 mm y se han dispuesto en las orientaciones mostradas en la Ilustración 59. Además, el refuerzo de acero ha tenido un espesor de 10 mm.

Fabric	Angle
chaleco	-45.0
chaleco	0.0
chaleco	45.0
chaleco	90.0
refuerzo	0.0
chaleco	-45.0
chaleco	0.0
chaleco	45.0
chaleco	90.0

Ilustración 59. Tabla de configuración para el apilado de materiales con distinta orientación de las fibras.

En la Ilustración 60, finalmente se observa el modelado final obtenido con la herramienta ACP (Pre), en la que se observa el volumen del conjunto y la orientación de las fibras sobre la superficie de la capa seleccionada.

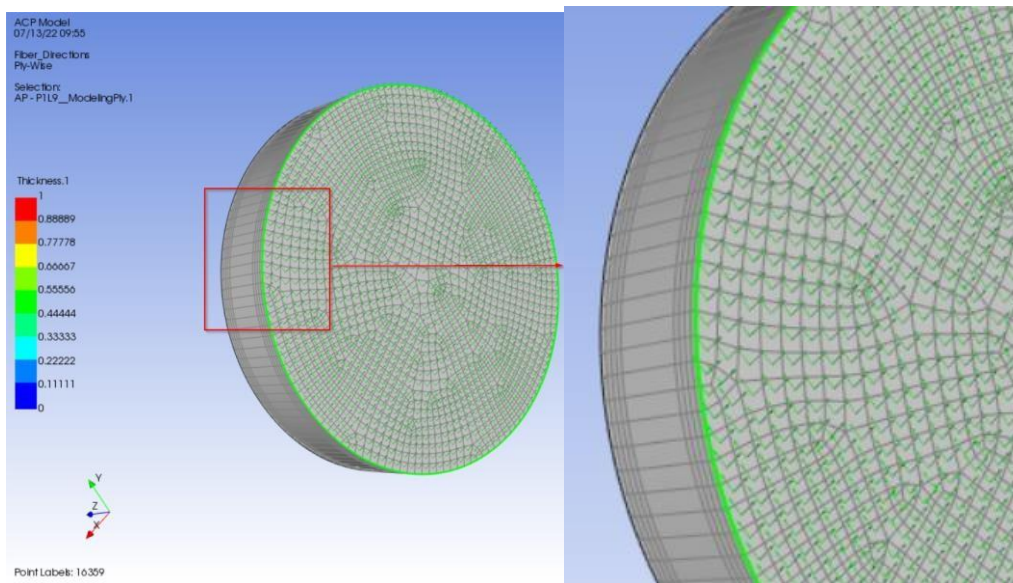


Ilustración 60. Imagen del diseño final desde el módulo ACP (Pre).

La conexión de la herramienta ACP (Pre) con Explicit Dynamics se muestra en el árbol del Modelo (B2). Tal y como se muestra en la Ilustración 61 se ha requerido adicionalmente de la configuración de las siguientes condiciones de contorno: generación de las regiones de contacto entre los distintos sólidos del chaleco, configuración de colisión habilitada para todos los cuerpos de la simulación y la generación de un soporte fijado. La generación de la fijación se ha realizado sobre las aristas del diseño, el cual se trata una superficie plana debido a que el módulo ACP (Pre) requiere trabajar con diseños planos.

En lo respectivo al mallado, se ha empleado un método de mallado automático para la bala, y un método de mallado cuadrangular/triangular para el chaleco, ambos con el parámetro de *Element Order* asignado a tipo lineal. Como criterio común al resto de simulaciones, cabe destacar que los mallados suelen ser diferentes, los cuales varían en función de la geometría del diseño. Por ejemplo, un diseño cilíndrico o esférico con una forma simple tenderá a tener un mallado con geometrías triangulares para repartir de forma más eficiente el espacio, mientras que un diseño cuadrado o rectangular estará mallado con celdas cuadrangulares, o, en el caso de las geometrías más complejas, hexágonos o mezcla entre distintas geometrías de malla.

Finalmente, se ha fijado una velocidad inicial vectorial para el sólido de la bala, de valor igual a lo indicado en la normativa para la munición de calibre

7,62X51 OTAN, es decir, 847 m/s en la dirección de la componente paralela al eje concéntrico al diámetro de la bala.

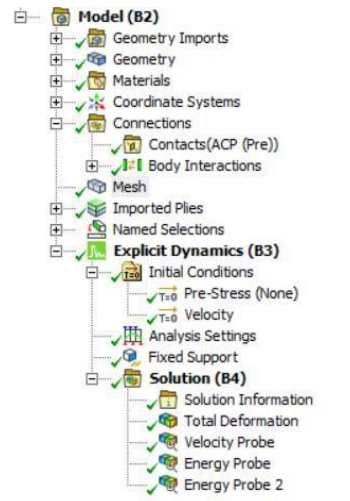


Ilustración 61. Árbol de configuración del módulo Explicit Dynamics.

Tras las diversas simulaciones, sólo se ha podido obtener una simulación completa debido a múltiples errores en el mallado, la configuración de los materiales y otros parámetros. Los resultados obtenidos carecen de coherencia con la realidad puesto que la bala, aparentemente, empieza a desintegrarse sin mostrar movimiento aparente, tal y como se muestra en la Ilustración 62 y la Ilustración 63.

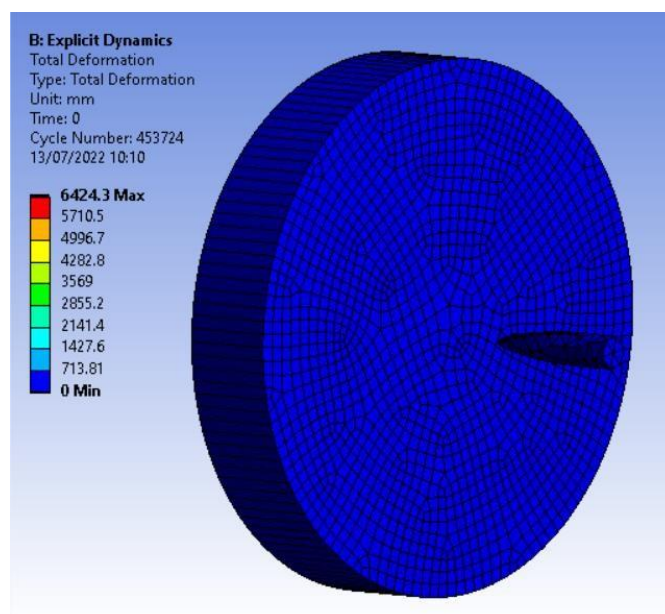


Ilustración 62. Imagen del modelo dinámico con material ortotrópico antes de iniciarse la simulación.

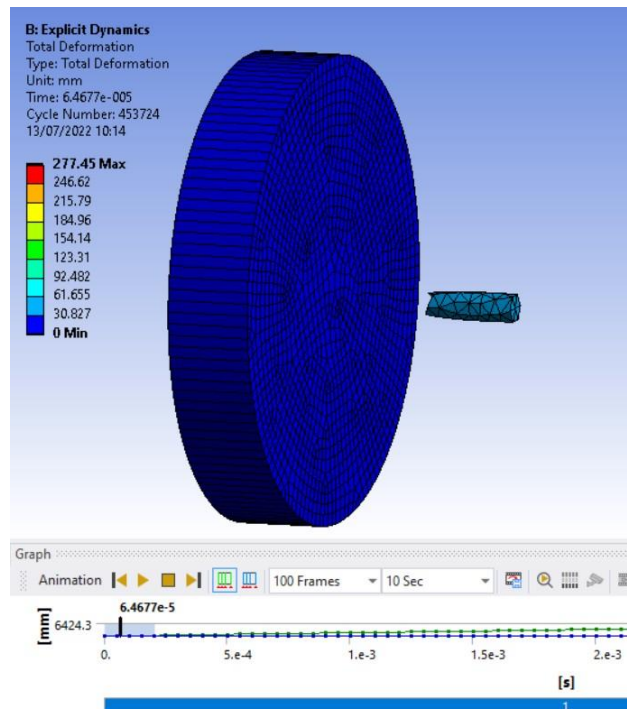


Ilustración 63. Imagen del modelo dinámico con material ortotrópico instantes después de iniciarse la simulación.

La complejidad de los cálculos y de la configuración no ha permitido obtener una simulación que mostrara datos concluyentes o un comportamiento realista, debido a que el programa ha arrojado errores de todo tipo, provocando que se desestimara seguir por este camino y se optara por una pequeña simplificación que permitiera obtener resultados concluyentes tras la simulación.

#### A.4.2.3. Modelado dinámico con estructura isotrópica para el chaleco

El modelo Isotrópico se ha planteado como una alternativa simplificada a los intentos fallidos de generación de un modelo Ortotrópico según lo expuesto anteriormente.

Para ello, se han realizado diversas modificaciones:

1. Se ha eliminado la herramienta de laminados compuestos, ACP (Pre), para lo cual no ha sido posible generar correctamente el laminado



según la información encontrada en la red, por lo que el comportamiento de los sólidos no era el deseado o generaba una mayor dificultad de resolución de la simulación.

2. Con motivo del cambio de propiedades Ortotrópicas a Isotrópicas, se han realizado cambios en el módulo de Datos de Ingeniería. La configuración de materiales para este apartado es la misma que para el modelo estático, por lo que se recomienda ver el apartado A.4.2.4.2.
3. Se ha empleado un diseño de la munición con una geometría simplificada para aliviar los requisitos de computación de la simulación.

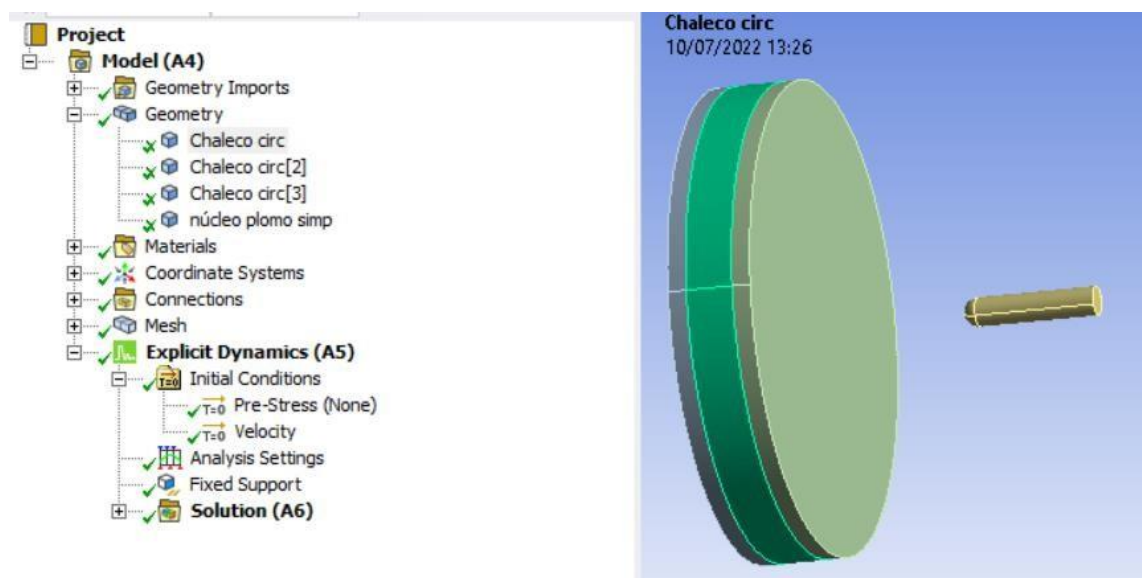


Ilustración 64. Imagen del módulo *Explicit Dynamics* en el modelo dinámico con materiales isotrópicos.

Al igual que ocurre con el modelo ortotrópico, se requieren de las mismas condiciones de contorno: generación de las regiones de contacto entre los distintos sólidos del chaleco, configuración de colisión habilitada para todos los cuerpos de la simulación y la generación de un soporte fijado. La única diferencia se observa en la generación de la fijación, la cual, en vez de aplicar a las aristas del diseño como ocurre en el modelo ortotrópico, esta vez se configura en las superficies laterales de los sólidos del chaleco, al igual que ocurre con el modelo estático (ver Ilustración 71).

En lo respectivo a las condiciones iniciales, el planteamiento es el mismo que en el modelo ortotrópico y se ha fijado una velocidad inicial vectorial para el sólido de la bala, de valor igual a lo indicado en la normativa para la munición de calibre 7,62X51 OTAN.

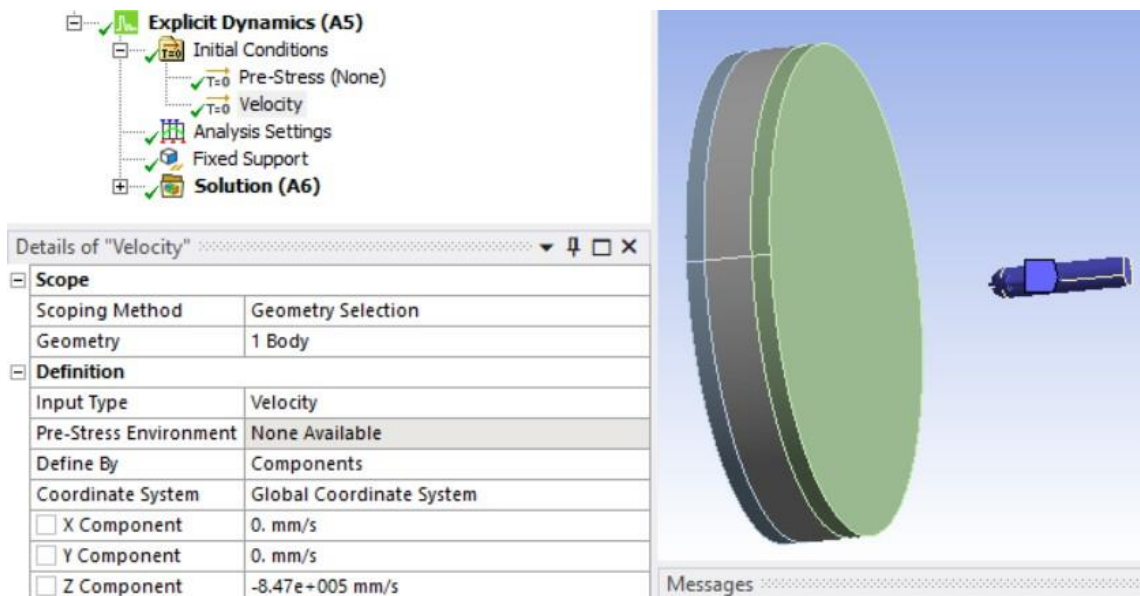


Ilustración 65. Imagen de la configuración de velocidad inicial en el modelo dinámico con materiales isotrópicos.

Por otra parte, a la hora de realizar el mallado, se han encontrado ciertas dificultades en el posterior lanzamiento de la simulación que han llevado a tener que variar en diversas ocasiones de modelo de mallado tanto para el chaleco como para la bala. Finalmente se han implementado modelos distintos de mallado Multizona para cada sólido. Su configuración ha sido similar, pero se diferencian en el Tipo de Mapeado de Malla, que ha sido hexahedral para la bala y prismática para el chaleco; además de en el Tipo de Malla Libre, que ha sido Hexahedral Predominante para la bala y Deshabilitado para el chaleco.

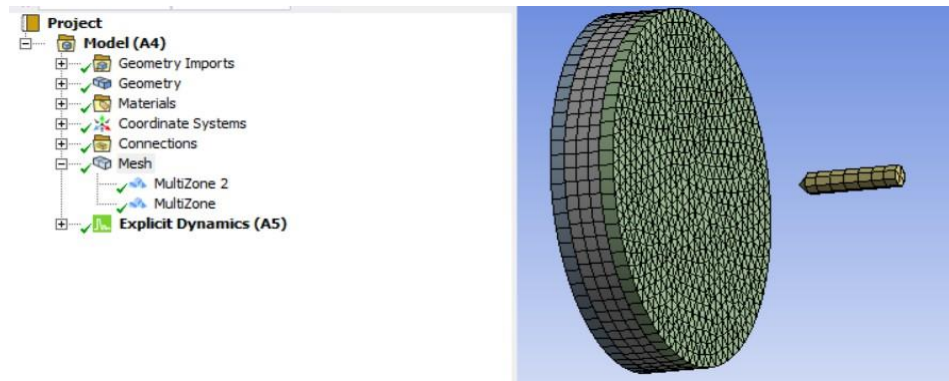


Ilustración 66. Mallado en el modelo dinámico con materiales isotrópicos.

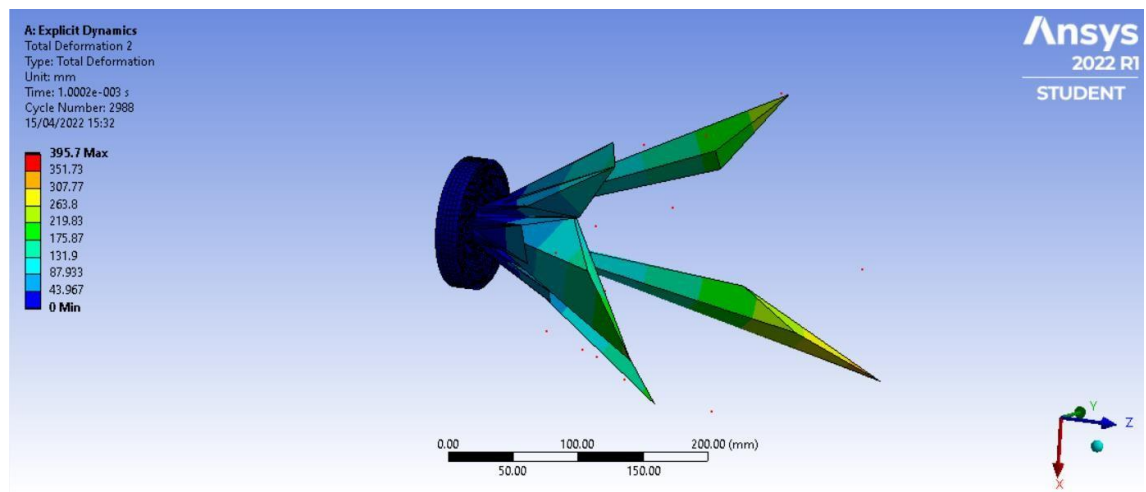


Ilustración 67. Resultados incoherentes en una de las simulaciones con materiales isotrópicos

Finalmente, los resultados de las diversas simulaciones bajo este apartado no han arrojado datos concluyentes y sólo ha sido posible aprovechar el modelo con la aplicación de un material genérico del sistema para poder obtener una estimación de tiempos simplificada que extrapolar a la realidad, la cual se ha empleado en el apartado A.4.1.1.

## A.4.2.4. Modelo estático.

Para generar un modelo estático se ha empleado la herramienta Static Structural, que se asemeja a la herramienta Explicit Dynamics, pero presenta distintos parámetros de entrada. Tras la experiencia de las múltiples pruebas hasta conseguir una simulación con unos parámetros óptimos, se podría afirmar con una gran seguridad que el modelo Static Structural con una variable de fuerza es mucho más sencillo de resolver que el modelo Explicit Dynamics con la colisión del cuerpo de la bala contra los cuerpos del chaleco.

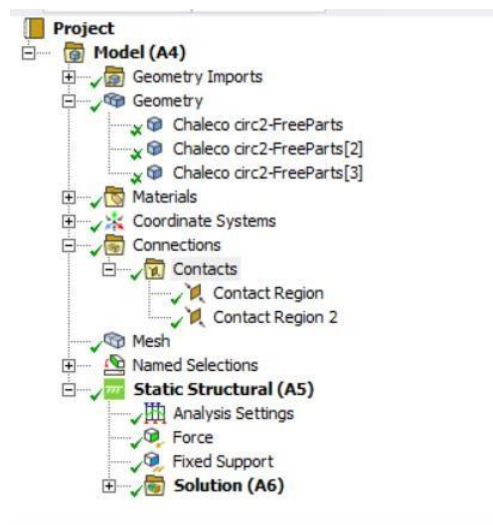
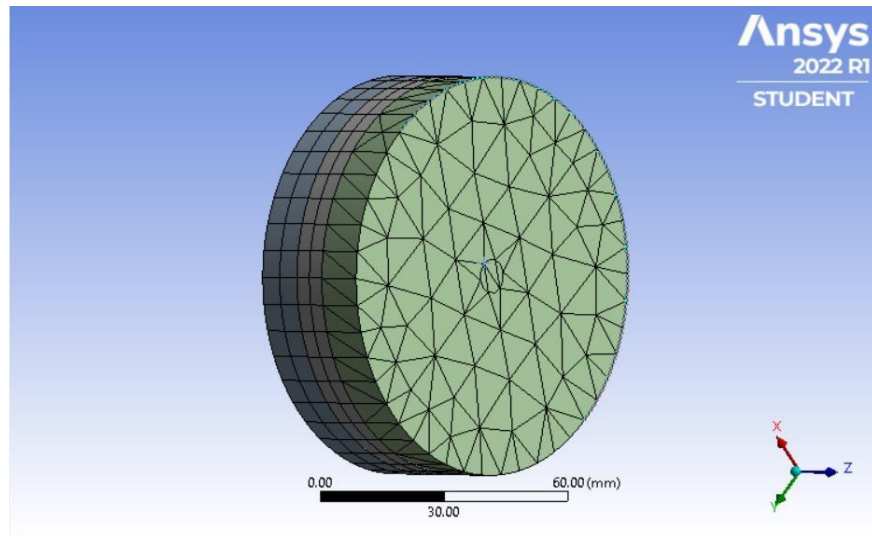


Ilustración 68. Imagen del árbol de configuración del módulo Static Structural en el modelo estático.

Por otra parte, dado que la geometría del chaleco es la misma y ha quedado bastante simplificado, el proceso de mallado no genera ninguna complicación, cosa que sí ocurría con las simulaciones de Explicit Dynamics debido a la compleja geometría de la bala y el ya complicado cálculo de la colisión. En este caso se ha generado una malla automática y el sistema ha configurado todos los parámetros de la malla acorde a las dimensiones y la forma de los sólidos.



*Ilustración 69. Mallado en el modelo estático*

#### A.4.2.4.1. Aplicación de condiciones de contorno.

Dentro de la configuración del modelo en el software de simulación, existen dos configuraciones necesarias para simular correctamente el comportamiento de un objeto que opone resistencia a un impacto de proyectil.

Por un lado, dado que el diseño consiste en una lámina de refuerzo colocada entre dos laminados de fibra, se requiere habilitar una zona de contacto entre los distintos objetos. Tal y como se ha mostrado en la Ilustración 68 y se aprecia en la Ilustración 70, la configuración de regiones de contacto tiene lugar entre los sólidos que tienen superficies que colisionan paralelamente, por lo que se ha generado una para el sólido intermedio (placa de refuerzo) y cada uno de los sólidos de los laminados (uno anterior y otro posterior), dando lugar a dos configuraciones en las que se tiene en común la intervención del sólido intermedio.

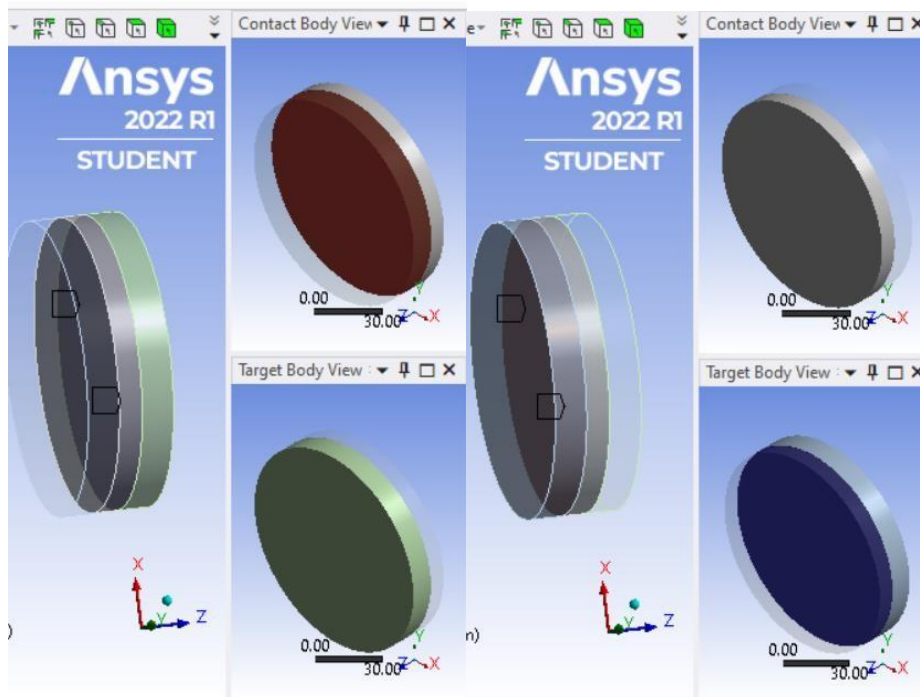
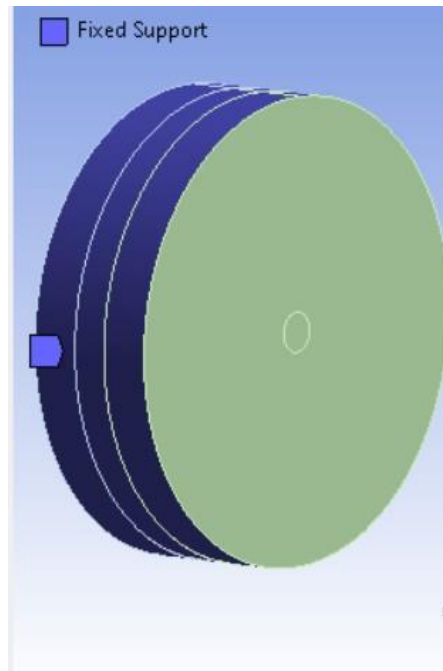


Ilustración 70. Configuración de las regiones de contacto.

Por otro lado, también se requiere establecer una fijación del objeto que representa el chaleco para que la energía del impacto no genere un desplazamiento total del chaleco hacia una región infinita del espacio, dado que existen parámetros de gravedad y viento que puedan frenar el proyectil.

De esta forma, se ha conseguido que el objetivo de la bala oponga resistencia en función de las propiedades del material configuradas. Para ello, tal y como se visualiza en azul en la Ilustración 71, se ha configurado un soporte fijo en toda la superficie lateral, la cual es la menos influyente en la obtención de resultados, pues dicha configuración aplica una restricción de desplazamiento en todas las direcciones y se requiere otorgar la máxima libertad de movimiento en las regiones anterior y posterior, pues serán las que recibirán la mayor deformación debida a la energía del impacto y donde se realizarán las mediciones indicadas en la norma.



*Ilustración 71. Configuración de los elementos de fijación*

#### A.4.2.4.2. Aplicación de materiales.

Para la configuración de los materiales existe un gran abanico de opciones que abarca desde las propiedades físicas, hasta criterios de elasticidad, plasticidad, fuerza, rotura, etc...

En primer lugar, para la configuración de los materiales, se ha accedido al módulo de Datos de Ingeniería y para todos los materiales se han escogido los siguientes módulos: Densidad, Elasticidad Isotrópica y Endurecimiento Isotrópico Bilineal. Se ha omitido la configuración de los módulos de Fuerza, debido a que se observaba una mayor complejidad de la simulación y no se conseguía simular la rotura de los materiales, por lo que solo se han configurado los materiales para simular la deformación, que es el factor más relevante del ensayo P-BFS.

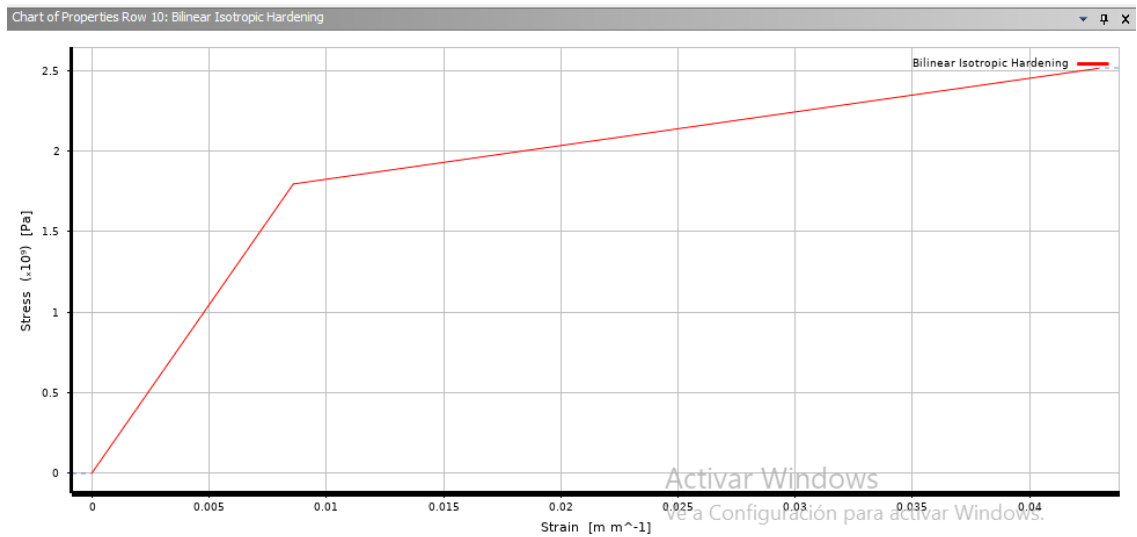


Ilustración 72. Gráfica de Tensión-Deformación generada tras configurar la plasticidad del material.

Una vez se han introducido los datos recogidos en la Tabla 4, se ha accedido al módulo de Geometría y se ha importado el diseño del chaleco en formato IGES. Posteriormente, desde el módulo de Modelo, se ha configurado la Asignación de Material en cada una de las geometrías generadas sin modificar ningún otro parámetro. Tal y como se observa resaltado en verde en la Ilustración 73, el primer sólido corresponde al elemento intermedio, la placa de refuerzo, mientras que los otros dos sólidos corresponden a los laminados de fibra, por lo que la asignación de materiales tendrá en cuenta este aspecto.



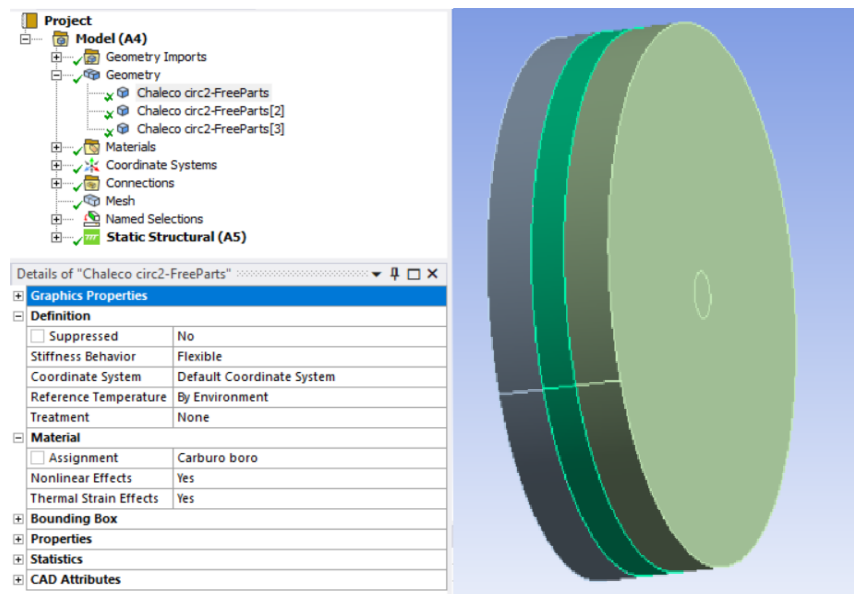


Ilustración 73. Configuración de la asignación de materiales

#### A.4.2.4.3. Aplicación de estados tensionales.

Una vez se dispone del valor de la fuerza que representa un impacto de bala de calibre 7,62x51, se ha procedido a configurarla en la interfaz de módulo de simulación de Static Structural.

Existen diversas opciones de configuración y las siguientes han sido las que finalmente se han aplicado: una fuerza definida por un vector, que el programa aplica directamente en la dirección normal a la superficie donde se aplica la fuerza; aplicado por un efecto de superficie, el cual se ha considerado mejor que una fuerza aplicada en un único punto del espacio, pues de esta forma se tiene en cuenta el área proyectada debida al volumen del proyectil; la magnitud definida por una tabla de datos, pues de esta forma es posible indicar al programa que cuando la simulación termine la fuerza debe ser igual a 0 (parada completa de la bala); la dirección definida en el eje Z y con sentido positivo; mientras que el resto de variables no se han modificado.

☐ Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
☐ Definition	
Type	Force
Define By	Vector
Applied By	Surface Effect
Magnitude	Tabular Data
Direction	Click to Change
Suppressed	No
☐ Tabular Data	
Independent Variable	Time

Ilustración 74. Opciones de configuración para la aplicación de una fuerza

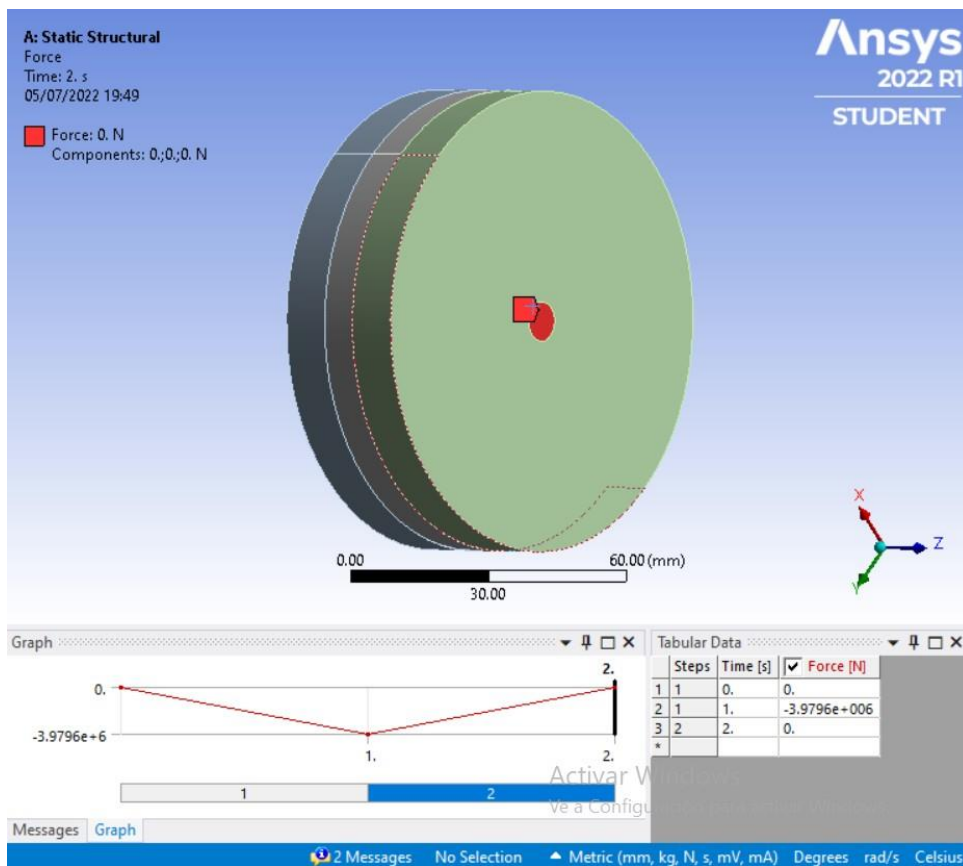


Ilustración 75. Aplicación de la fuerza en el modelo según una configuración tabular de datos.

### A.4.2.5. Análisis de deformaciones.

Teniendo en cuenta lo indicado en el apartado A.1.2.6., todas las simulaciones realizadas bajo el modelo estático, tal y como se muestra en la Tabla 9, cumplen con el requisito de deformación máxima de la cara posterior, el cual está limitado a 44 mm. Sin embargo, se ha considerado minimizar al máximo la deformación debido a que se conoce que puede producir traumas en las zonas del cuerpo próximas al impacto. Por otra parte, también se ha tenido en cuenta la masa del chaleco para escoger una opción lo suficientemente ligera como para que no suponga un problema de movilidad en un contexto de combate.

Tras dicho análisis, existen dos simulaciones que han arrojado datos muy positivos en comparación al resto.

Por un lado, la configuración Ke-Bo-Ke, formado por Kevlar y Carburo de Boro (laminados de Kevlar frontal y posterior y un refuerzo de carburo de boro), presenta una deformación inferior en un 90% a la media de BFD de todas las simulaciones, mientras que la masa es un 18% superior a la media de masa del conjunto de simulaciones.

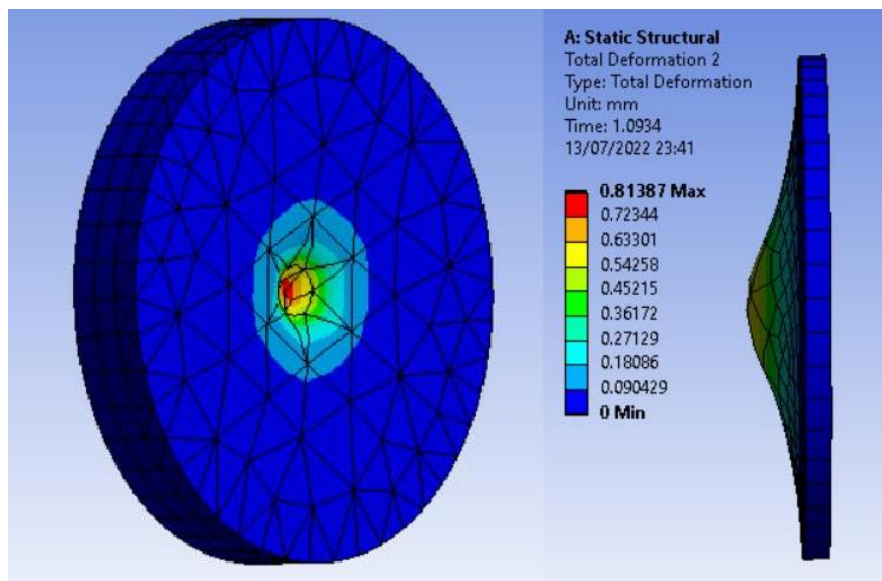


Ilustración 76. Deformación del modelo de la simulación 2.

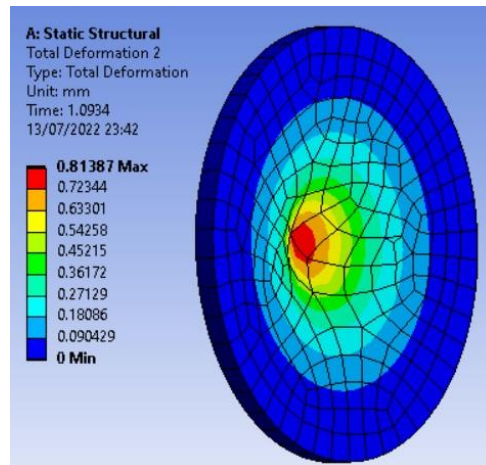


Ilustración 77. Deformación en la capa posterior del modelo de la simulación 2.

Por otra parte, la configuración Pe-Bo-Pe, formado por UHMWPE y Carburo de Boro (laminados de UHMWPE frontal y posterior y un refuerzo de Carburo de Boro) con un espesor por capa de 6-5-6, presenta una deformación inferior en un 94% a la media de BFD de todas las simulaciones, mientras que la masa tan solo es un 1% superior a la media de masa del conjunto de simulaciones. En comparación con la opción de Ke-Bo-Ke, esta alternativa es un 14% más ligera y presenta un 37% menos de deformación.

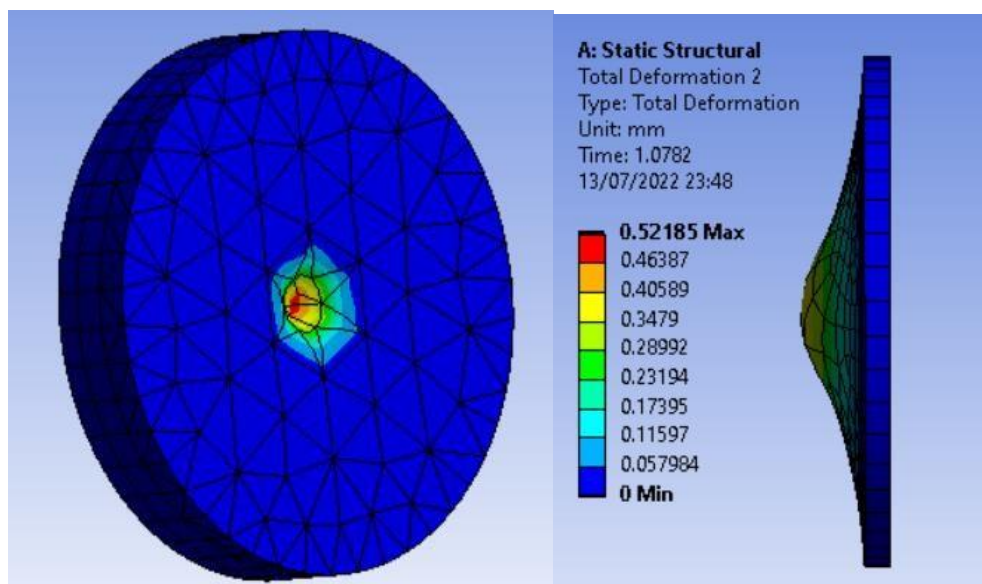


Ilustración 78. Deformación del modelo de la simulación 7.

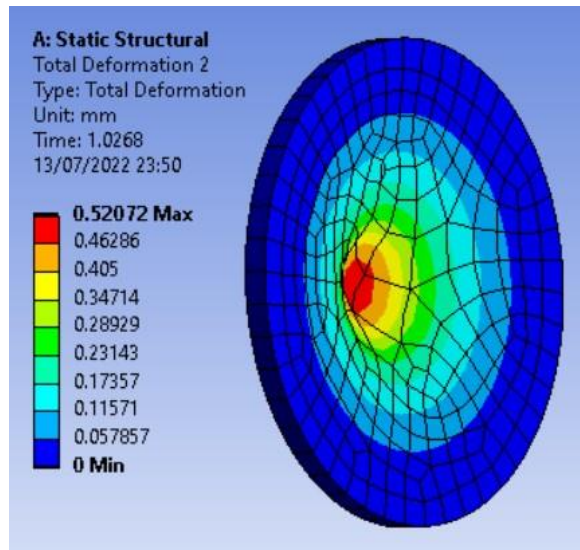


Ilustración 79. Deformación en la capa posterior del modelo de la simulación 7.

Tabla 9. Datos finales obtenidos con las simulaciones.

Nº Simulación	Espesor por capa (mm)	Configuración	Fuerza (N)	BFD (mm)	Masa total (kg)
1	5-5-5	Pe-Bo-Pe	2,5989*10 <sup>5</sup>	6,78	6,35
2	5-5-5	Ke-Bo-Ke		0,81	8,37
3	20	PE		5,7	8,43
4	16	PE		11,87	6,74
5	15	PE		14,84	6,32
6	14	PE		18,79	5,90
7	6-5-6	Pe-Bo-Pe		0,52	7,19
8	7-4-7	Pe-Bo-Pe		5,06	7,60

Tras los resultados observados en la Tabla 9, se comprueba que, en unas condiciones de diseño similares (placa de refuerzo del mismo material y con espesor similar), la alternativa de UHMWPE presenta un rendimiento ligeramente superior al Kevlar y una disminución importante de masa, lo que lo hace un material ideal para su uso en blindaje corporal.

Cabe destacar que, aunque no se haya mostrado ninguna simulación con el empleo del refuerzo de acero, dicha alternativa presenta una masa demasiado elevada en comparación al carburo de boro, lo que hace difícil su uso cuando los espesores de placa se han conseguido modelar bastante bajo de por sí. Además, el rendimiento a bajos espesores no distaba demasiado del que presentaba el refuerzo de B4C.

En resumidas cuentas, partiendo de los planteamientos indicados en los apartados III.3.2. y III.3.3., la configuración de blindaje alternativa (UHMWPE + acero, en el planteamiento inicial de la selección de materiales) finalmente no ha empleado un material distinto para el refuerzo, pero sí se ha constituido una configuración novedosa, la cual sustituye el Kevlar por UHMWPE, además de ser distintos los espesores por capa de laminado. De esta forma, se procede a comprobar la viabilidad de fabricación para los diseños realizados y los materiales seleccionados.

# A.5. Fabricación

En este apartado se tratarán todos los aspectos relativos a la fabricación industrial de los diseños realizados.

## A.5.1. Selección de procesos de fabricación

El objeto de este apartado es el de recoger el proceso seguido para la selección de los métodos de fabricación más adecuados, tanto desde el punto de vista económico como desde el de la viabilidad desde el aspecto técnico.

La búsqueda de procesos de fabricación se ha apoyado con el software Granta EduPack 2021 R2, el cual permite realizar búsquedas con muchos parámetros de acotación de los resultados, además de en la búsqueda en artículos de investigación.

### A.5.1.1. Procesos de fabricación para el blindaje rígido

En este apartado se ha realizado una selección de procesos de fabricación adecuados para la fabricación del diseño mostrado en el apartado A.2.1.2.2. Conociendo que el material empleado se trata de Carburo de Boro y la geometría del producto que se pretende fabricar es la relativa a un sólido 3D sin formas cilíndricas ni partes huecas, se ha realizado una búsqueda en la base de datos de Granta EduPack 2021 R2 para dicho material.

De los resultados que se han obtenido, se ha descartado el prensado isostático en frío por ser un proceso distinto a lo indicado por James Campbell et al. en su artículo, *“Novel processing of Boron Carbide (B4C): plasma synthesized nano powders and pressureless sintering forming of complex shapes”*, enfocado a la fabricación de placas de blindaje de uso militar con procesos de fabricación basados en las altas temperaturas. Por último, el proceso de prensado y sinterizado ha sido rechazado también por tratarse del método de fabricación más costoso en cuanto a inversión de capital de todos los métodos resultantes y no diferenciarse mucho en cuanto a calidad con los métodos se expondrán en los próximos apartados.

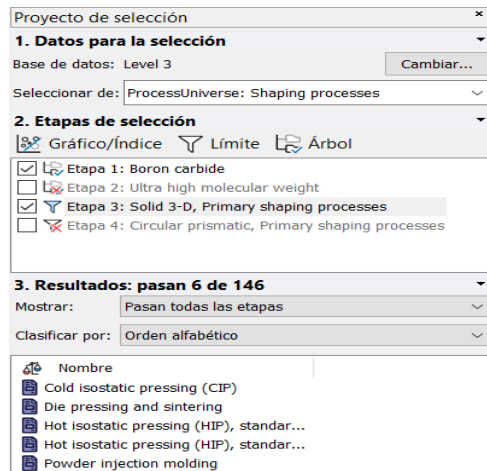


Ilustración 80. Proceso de selección de métodos de fabricación para el blindaje rígido.

### A.5.1.1.1. Obtención de polvos cerámicos

El polvo cerámico se produce normalmente a través de la reducción carbotérmica del óxido de boro en un horno de arco eléctrico (Acheson). El producto final es un gran lingote de B<sub>4</sub>C que debe ser pulverizado y molido en los tamaños de grano y polvo deseados.

Tanto la operación en el horno de alta temperatura y las posteriores operaciones de molienda hacen que la fabricación de polvo de B<sub>4</sub>C requiera una gran cantidad de energía, lo que explica el alto coste del polvo y la capacidad limitada de producción.

Después de que el polvo de B<sub>4</sub>C se muele y se clasifique, sólo una parte es de calidad de blindaje, ya que hay variabilidad del material en el lingote. Normalmente, el carburo de boro en formato polvo, de grado de blindaje, tiene un coste de aproximadamente 108 €/kg.



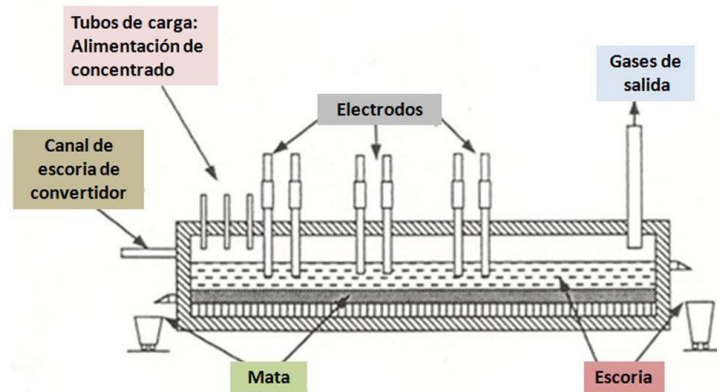


Ilustración 81. Esquema de un horno de arco eléctrico

### A.5.1.1.2. Prensado isostático en caliente

Partiendo de haber obtenido la materia prima en formato polvo, la mezcla de polvo se debe moler durante unas horas en una solución de petróleo, luego secar y, posteriormente, volver a moler en un molino de bolas para deglomerarlo. A continuación, el cuerpo verde moldeado se procede a evaporar al vacío a 600°C durante 3 horas para desaglutinarlo.

Una vez los polvos han sido adecuadamente procesados, se encapsulan en un recipiente metálico deformable, se evacua y sella el recipiente. A continuación, se bombea Argón dentro de la cámara HIP para someterlo a una temperatura de 1850°C durante 1 hora, generando una presión de 160 MPa sobre el contenedor con los polvos cerámicos[19].

La lata (el contenedor o recipiente metálico deformable) impide que el gas circundante penetre en el cuerpo cerámico a través de la porosidad abierta y equilibra la presión dentro del material cerámico en formación con la presión aplicada externamente. Al mismo tiempo que el cerámico recibe la compactación necesaria para la unión de los granos, se produce la sinterización debido al calor ambiente, lo cual disminuye la porosidad del producto y da lugar a un producto mucho más resistente. Cabe destacar que, durante el proceso, la pieza resultante duplica la forma de la lata, por lo que la forma del contenedor se debe planear a conciencia para conseguir que la pieza fabricada mediante prensado isostático en caliente tenga las dimensiones finales deseadas[20].

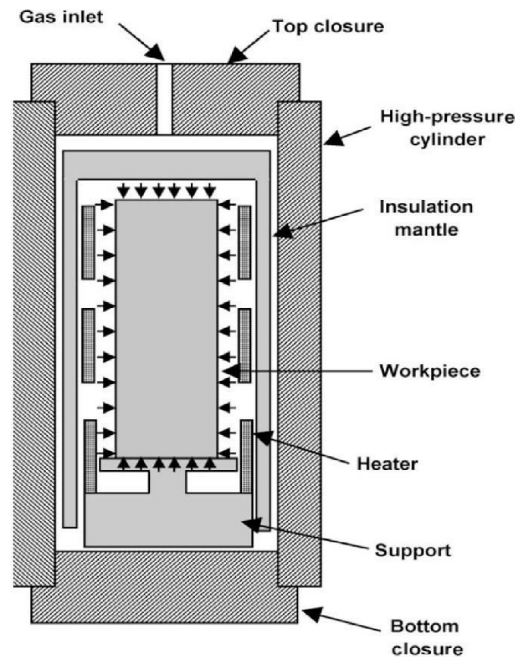


Ilustración 82. Esquema de una cámara de prensado isostático en caliente

#### A.5.1.1.4. Moldeo por inyección de cerámicos

Una vez determinada la mezcla de polvos, el siguiente paso es la selección del aglutinante más adecuado para la aplicación designada. El procesamiento de una materia prima cerámica requiere componentes poliméricos que sean capaces de soportar las severas fuerzas necesarias para romper los aglomerados.

Los requisitos mínimos para los sistemas aglutinantes incluyen una baja viscosidad para garantizar el llenado completo de las cavidades del molde, una estabilidad mecánica relativamente alta para garantizar una extracción segura de un molde, una buena retención de la forma y una baja contracción durante el desmoldeo y la sinterización[21].

Los aglutinantes están formados por varios componentes:

- Un polímero básico de bajo peso molecular para facilitar la extracción durante el desbobinado, como plastificantes entre las largas cadenas poliméricas del polímero de base para reducir la viscosidad dinámica de las materias primas y proporcionar una propiedad reológica adecuada, garantizando así un llenado completo de la cavidad durante la inyección de la materia prima en el molde.
- Un aglutinante de base para la resistencia del componente.

- A menudo, pero no siempre, aditivos como lubricantes o agentes dispersantes.

El objetivo es tener menos componentes de los posibles para reducir la tendencia a la separación de la mezcla debido a las altas presiones del proceso.

Los polímeros comúnmente elegidos para el CIM son el polipropileno, el polietileno de baja densidad, el etileno, el acetato de vinilo, el poliestireno, el polimetilmetacrilato, el poliactal o la poliamida.

Dependiendo de la composición del aglutinante, existen diferentes procedimientos de desaglomerado, sin embargo, el procedimiento de desaglutinado más habitual es la combinación de un predescolmatado con un disolvente (agua, acetona, isopropanol, heptano) y un posterior proceso de desagregación térmica. El objetivo del desligado con disolventes es eliminar un aditivo aglutinante soluble para crear una porosidad abierta. La porosidad abierta permite que, durante la etapa de desaglomerado térmico, los orgánicos descompuestos se difundan fácilmente a la superficie. De este modo, se puede reducir el tiempo de desagregación y el riesgo de grietas y vacíos.

Para la inyección, la materia prima granulada se introduce en el barril de la máquina y se calienta para producir una masa semifluida. En una máquina de tornillo, la mayor parte del calor procede de las fuerzas de fricción entre el material del tornillo y el cilindro. A continuación, la masa semifluida se introduce en la cavidad del molde a través de un sistema de canalización de la herramienta. En las máquinas de tornillo, la barrera de retroceso permite que el tornillo sinfín actúe como un pistón, empujando el medio de moldeo hacia la cavidad de la herramienta.

A partir de un determinado grado de llenado del molde (aprox. 95%-97%), el llamado punto de conmutación, la presión de inyección pasa a ser de retención, para evitar una reducción del volumen de la pieza moldeada por inyección debido al enfriamiento, hasta que la compuerta del canal se enfría y la pieza se vuelva sólida.

Después de un tiempo de enfriamiento específico (típicamente 10-300 s) que depende del volumen de la pieza moldeada por inyección y del

comportamiento de solidificación de la masa semifluida, la herramienta se abre, y, empujando el sistema eyector de la máquina hacia delante, la pieza es expulsada y puede ser retirada. El bebedero se retira y la pieza inyectada puede colocarse en las bandejas de sinterización para el posterior tratamiento térmico (desbastado y sinterización).

Durante la fase de enfriamiento de la pieza en el utillaje cerrado, el tornillo es empujado hacia atrás y comienza la retracción de la materia prima y la dosificación de nuevo para la siguiente inyección.

El control de la temperatura del proceso de moldeo por inyección, especialmente el control de la temperatura de la herramienta, desempeña un papel dominante para una producción fiable y una alta calidad de las piezas moldeadas por inyección. Principalmente, los procesos CIM se basan en una temperatura de molde isotérmica, que oscila entre 130 y 2001 °C y se inyectan utilizando presiones de barril de entre 50 y 150 MPa. Dado que la temperatura de la herramienta es considerablemente inferior al punto de fusión del material de alimentación, se requieren altas velocidades de inyección. Sin estas velocidades más altas, no se puede lograr un llenado adecuado de las cavidades sin el enfriamiento prematuro del material de alimentación. En consecuencia, la temperatura del molde debe ser llevada al punto de fusión de una forma controlada durante la inyección.

Además, hay que tener en cuenta que las piezas cerámicas suelen encogerse durante la sinterización entre un 14% y un 22% aproximadamente, en función de la densidad de empaquetamiento de las piezas verdes[22].

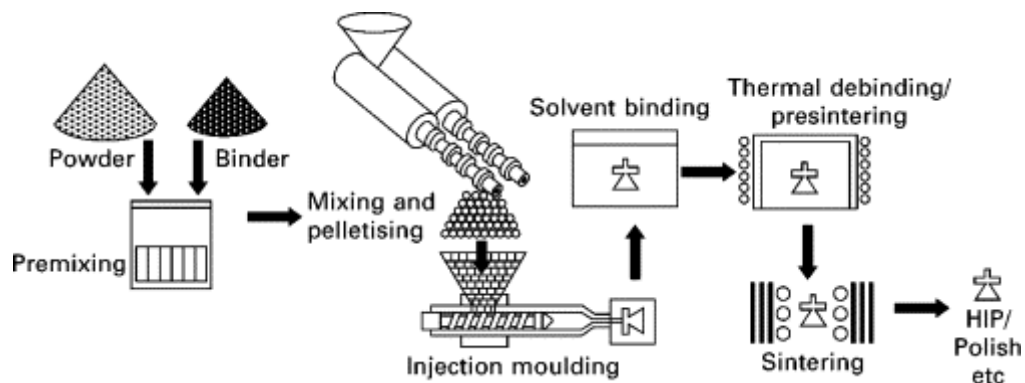


Ilustración 83. Esquema del proceso de inyección de materiales cerámicos.

## A.5.1.2. Procesos de fabricación para el blindaje flexible

En este apartado se ha realizado una selección de procesos de fabricación adecuados para la fabricación del diseño mostrado en el apartado A.2.1.2.1. Conociendo que el material empleado se trata de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) y la geometría del producto que se pretende fabricar pasa primero por la fabricación del hilo, de geometría cilíndrica, y posteriormente por láminas; se ha realizado una búsqueda en la base de datos de Granta EduPack 2021 R2 para dicho material.

Los resultados que se han obtenido se han filtrado y algunos se han descartado por considerarse que no se adaptan a los requisitos del diseño. Los procesos descartados son: el proceso de fabricación con partículas balísticas por estar obsoleto, el proceso de fabricación aditiva (Material Jetting) por ser un método de fabricación por impresión 3D y no considerarse apropiado para generar un hilado, el modelado por deposición fundida (Material Extrusion) por tratarse del mismo caso anterior, y la inyección de polímeros por considerarse un proceso de fabricación sobredimensionando para las necesidades y no ser adecuado el hilado.

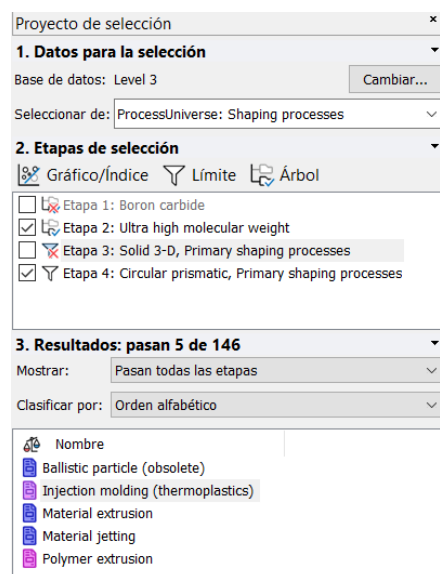


Ilustración 84. Proceso de selección de métodos de fabricación para el blindaje flexible.

### A.5.1.2.1. Extrusión de polímeros

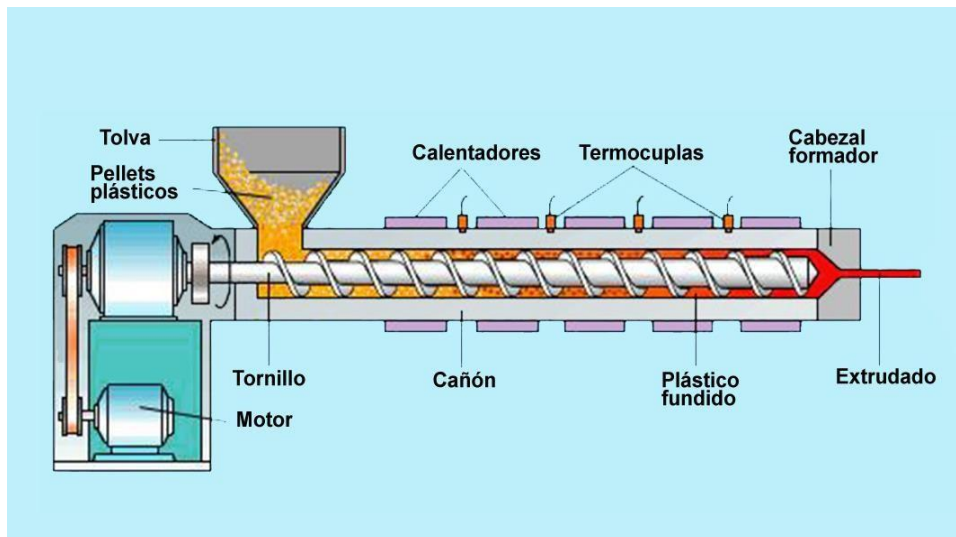
En la extrusión de polímeros, el polímero en polvo o en forma de gránulo/pellet se procesa mediante un tornillo giratorio a través de una cámara de calentamiento y la masa fundida resultante es forzada a través de un orificio en forma de matriz.

El producto extruido se enfría al salir de la matriz. A continuación, el producto extruido se "reduce" a una sección transversal más pequeña. Las variaciones del proceso incluyen el soplado de películas, el moldeo por extrusión y soplado y conformado de filamentos.

La extrusión también se utiliza como proceso previo a muchos de los procesos de moldeo, como el moldeo por inyección, o en el hilado en gel, como ocurre en este caso.

El proceso tiene la ventaja de que los costes de las herramientas son relativamente bajos, aunque los costes de capital son elevados y el resultado suele requerir un procesamiento posterior, que va desde el simple corte a medida hasta la refundición y el moldeo por inyección.

El diseño de las matrices es complicado debido al "hinchamiento de la matriz", por lo que las tolerancias no son tan estrictas como en los procesos de moldeo a presión.



*Ilustración 85. Esquema de una extrusora de polímeros*

### A.5.1.2.2. Hilatura en gel de polímeros

La hilatura en gel, también conocida como hilatura semifundida, es un método que prepara fibras de alta resistencia y elasticidad en estado de gel. Tras la extrusión de la solución polimérica o del gel plastificado de las hileras, se enfría en disolvente o en agua antes de ser estirado. Durante el proceso de enfriamiento, la solución polimérica pierde gradualmente la capacidad de movilidad de la solución, lo que se conoce como la gelificación de los polímeros. Posteriormente, en el proceso de gelificación, la viscosidad de la solución aumenta gradualmente y, hasta que no se produce la formación del gel, la viscosidad se vuelve infinita. Como la nueva fibra formada contiene una gran cantidad de disolvente, y se encuentra en estado de gel, se requiere un estirado extremo para producir una fibra de alta resistencia y alto módulo.

La hilatura en gel genera estructuras relativamente ideales para los polímeros de cadena flexible ordinarios (por ejemplo, PE y PVA) para producir fibras de alta resistencia y módulo.

El proceso general de hilatura en gel puede dividirse en los siguientes cuatro pasos:

1. Disolución del polímero en el disolvente: las cadenas moleculares de los polímeros sólidos pueden estar enredadas, y los enredos afectarán al estiramiento de la cadena molecular. La disolución de los polímeros en el disolvente puede deshacer estos enredos para ayudar al estiramiento de la fibra de gel.
2. Hilado y formación: se extrae el disolvente de las hileras mediante una bomba de engranajes y se enfría rápidamente mediante aire o agua. El proceso de enfriamiento rápido puede conllevar la formación de cristales y mantener el estado “desenredado” de los polímeros para ayudar a la formación de un módulo de alta resistencia y elasticidad de la fibra.
3. Eliminación del disolvente: los métodos más utilizados para eliminar el disolvente en la hilatura de gel incluyen el método de secado natural y el uso de extractores, que tiene como objetivo principal eliminar los residuos de disolvente en la fibra de gel. El extractor puede desplazar el disolvente de la hilatura de gel basándose en los principios de difusión y penetración. En la hilatura de gel, la selección

del disolvente y del extractor afectan directamente a la estabilidad del estiramiento.

4. Estiramiento: El estiramiento puede cambiar las cadenas moleculares plegadas del polímero por cadenas rectas y mejorar la cristalinidad y la orientación del polímero. Esta es una característica única de la hilatura de gel, y es la clave para mejorar el rendimiento de las fibras de gel.

En la actualidad, la hilatura en gel del UHMWPE utiliza disolventes como aceite de parafina, decalina y parafina. La decalina tiene el mejor efecto de disolución; sin embargo, no puede producirse en masa debido a su elevado precio. Actualmente, se suele utilizar como disolvente una mezcla de queroseno y aceite emulsionante. Los extractores más utilizados son el tricloro-trifluoro-etano, el decano y la gasolina. El estiramiento del UHMWPE pretende enderezar la cadena molecular plegada para mejorar las propiedades mecánicas.

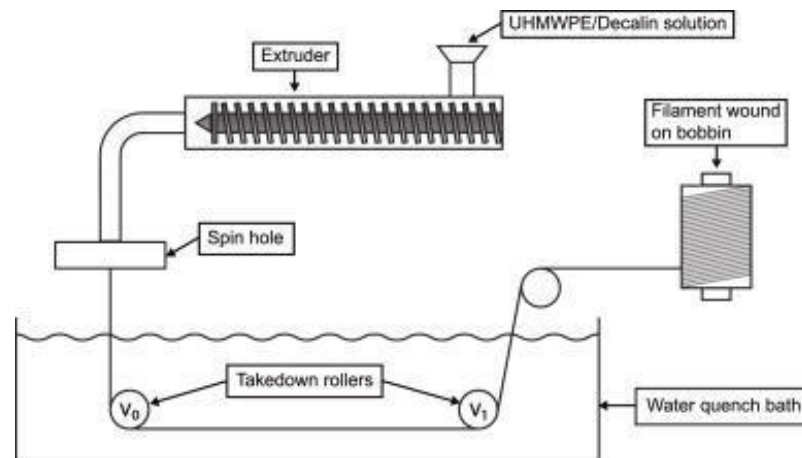


Ilustración 86. Esquema del proceso de hilado en gel para el UHMWPE.

### A.5.1.2.3. Proceso de laminado

Para la fabricación del tejido laminado se ha optado por un proceso de fabricación por Pre-impregnado, en el que se requiere como materia prima fundamental hilo de polietileno de ultra alto peso molecular, cuyo método más eficiente de obtención se considera que es el expuesto en el apartado A.5.1.2.2.



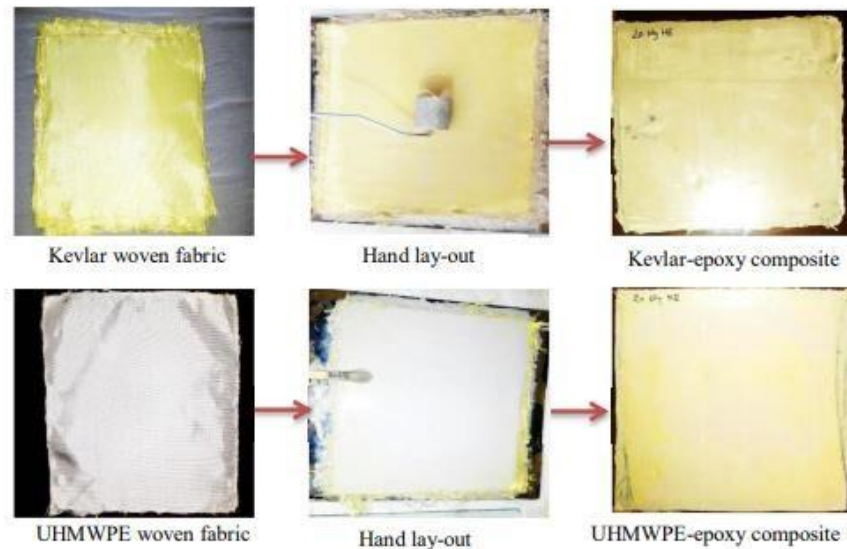


El proceso de fabricación requiere del uso de un adhesivo para la unión de las fibras, que deben disponerse tensadas con la ayuda de algún aparato durante su inmersión en el adhesivo. Se ha planteado principalmente el uso de resina epoxi como adhesivo por ser usado ampliamente en la fabricación de materiales compuestos formados a partir de polímeros.[23]

Este proceso de laminado requiere de los siguientes productos como materia prima: hilo de UHMWPE, alcohol polivinílico, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ácido sulfúrico), solución de glutaraldehído, resina epoxi y agente de curado. Las proporciones en masa de fibras, resina y agente de curado son  $60 \pm 1\%$ ,  $35 \pm 0,5\%$  y  $5 \pm 0,2\%$ , respectivamente.[24]

Los pasos que se deben seguir para la fabricación son:

1. Preparar el hilo de UHMWPE en un dispositivo que disponga en tensión un número determinado y suficiente de hilos para generar una primera capa con una única orientación de las fibras.
2. Sumergir los hilos en una disolución de alcohol polivinílico, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y glutaraldehído.
3. Secar las fibras a 60°C durante 4h.
4. Mezclar la resina epoxi con el agente de curado en un recipiente
5. Una vez se haya iniciado la reacción química entre el agente de curado y la resina epoxi y haya transcurrido el tiempo necesario según el fabricante, se debe aplicar equitativamente la mezcla sobre el UHMWPE.
6. Finalmente, el material se debe someter a un prensado por un vulcanizador plano a una temperatura de 20°C y una presión de 10 MPa, durante unas 8h.



*Ilustración 87. Proceso de preimpregnado manual*

#### A.5.1.2.4. Procesos de corte para el blindaje flexible

Entre los procesos seleccionados para el corte con la configuración de búsqueda de un proceso apropiado para el UHMWPE y en formato de láminas planas, se han encontrado los resultados mostrados en la Ilustración 88.

Se han descartado los métodos de corte por láser y el de corte por hilo caliente por ser métodos que generan un aporte de calor a la superficie del plástico, lo cual puede repercutir en las propiedades mecánicas.

Por otra parte, los métodos de corte por sierra circular se han descartado por tener unas tolerancias demasiado elevadas y generar una mayor rugosidad que el método seleccionado.

Finalmente, se ha escogido el método de corte por chorro de agua por ser uno de los métodos que incide verticalmente y se puede adaptar mejor a las circunstancias, puesto que se pretende cortar el chaleco para darle forma tras la unión de los bloques de cuatro láminas. Por otra parte, las características que ofrece el proceso en cuanto a tolerancias de entre 0 y 0,5 mm y rugosidades de entre 0,8 y 6,3  $\mu\text{m}$  resultan más que aceptables.

The screenshot shows a software interface with three main sections:

- 1. Datos para la selección**: Includes a database level (Level 3) and a selection dropdown (ProcessUniverse: Shaping processes).
- 2. Etapas de selección**: Features navigation icons (Gráfico/Índice, Límite, Árbol) and a list of five selection steps with checkboxes:
  - Etapa 1: Boron carbide (unchecked)
  - Etapa 2: Ultra high molecular weight (checked)
  - Etapa 3: Solid 3-D, Primary shaping processes (unchecked)
  - Etapa 4: Circular prismatic, Primary shaping processes (unchecked)
  - Etapa 5: Flat sheet, Cutting processes (checked)
- 3. Resultados: pasan 5 de 146**: Shows filters for 'Mostrar' (Pasan todas las etapas) and 'Clasificar por' (Orden alfabético). Below this is a list of cutting methods with red icons: Band saw, Circular saw, Hot wire cutting, Laser cutting, and Water jet cutting.

Ilustración 88. Proceso de selección de métodos de corte para el blindaje flexible.

El proceso de corte por chorro de agua es un método industrial que emplea una corriente de alta velocidad de agua a una presión muy elevada (210-620 MPa) que es producida por una bomba de alta presión con posibles partículas abrasivas suspendidas en la corriente.[25]

Se utiliza para el mecanizado de una gran variedad de materiales, incluidos los materiales sensibles al calor, pues no produce daños por calor en la superficie de la pieza ni en sus bordes, y en los materiales delicados o muy duros.

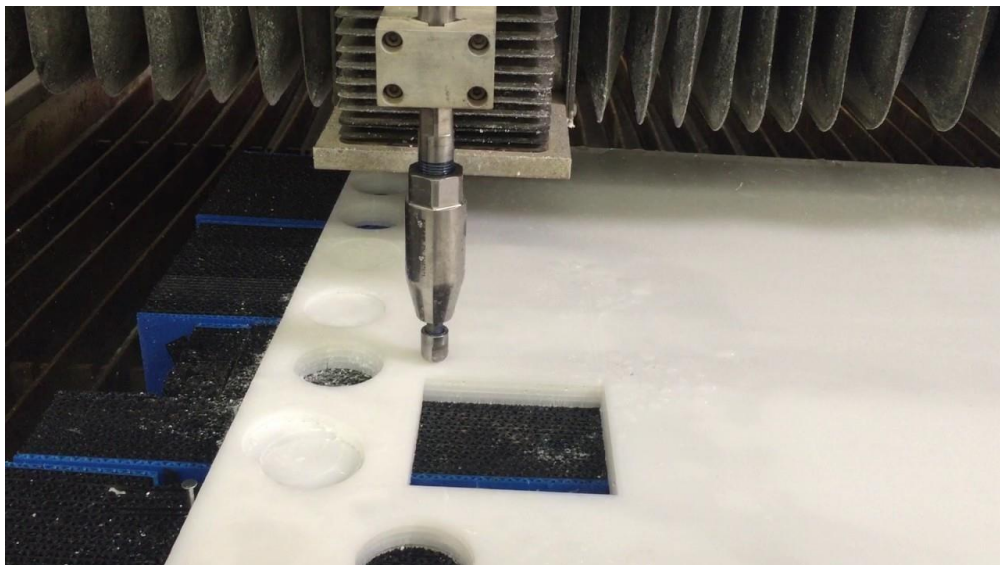
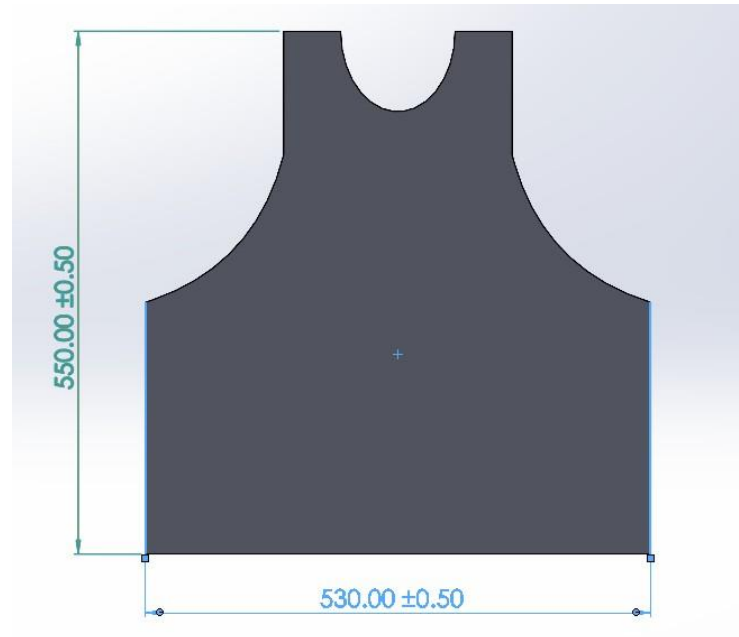


Ilustración 89. Proceso de corte por chorro de agua visto desde una máquina real.



*Ilustración 90. Diseño del chaleco para el patrón de corte por chorro de agua.*

Tras la medición en software CAD, se ha estimado una longitud total de corte por chaleco de 934 mm para unas hipotéticas láminas de dimensiones 550x530 mm.

### A.5.2. Procesos de fabricación seleccionados.

Finalmente, entre los procesos de fabricación expuestos en los anteriores subapartados, los que han sido finalmente seleccionados, según el tipo de blindaje, son:

- **Blindaje rígido:** para el blindaje rígido se optado por aplicar el proceso de reducción carbotérmica mediante horno eléctrico para obtener la materia prima y el proceso de moldeo por inyección de cerámicos (CIM) para la fabricación del producto final por tener un alto ratio de producción y presentar unos requisitos de inversión de capital inferiores a los del proceso de prensado isostático en caliente para producción a gran escala.

- Blindaje flexible: para este caso de fabricación se han empleado todos los procesos mostrados, ya que, las únicas alternativas de fabricación encontradas han sido la extrusión de polímeros y el hilado en gel, cuando el proceso de hilado en gel lleva implícito un proceso de extrusión de polímeros. De esta forma, se procedería a la fabricación del hilo mediante extrusión de polímeros e hilado en gel, la laminación mediante el método de Pre-impregnados (Prepreg) y el corte mediante chorro de agua. Cabe destacar que el proceso finalizaría con algún método textil de unión, pero se ha omitido por ser competencia de la Ingeniería Textil.



## A.6. Estudio económico

En este apartado se va a analizar la viabilidad del proyecto de fabricación para el producto diseñado en el apartado A.2. con los procesos de fabricación expuestos en el apartado A.5.2. El análisis se realizará mediante el método del Valor Actual Neto (VAN).

### A.6.1. Estudio económico para la fabricación del blindaje rígido

En este apartado se va a analizar el coste económico que suponen para las distintas alternativas para la comercialización del blindaje rígido diseñado en los anteriores apartados.

En primer lugar, para los métodos de fabricación expuestos en el apartado A.5.1.1., cabe tomar la decisión si todos los procesos van a ser asumidos por un hipotético fabricante que se decida por la fabricación de los productos diseñados en este TFG, o si parte de los procesos o todos ellos van a ser subcontratados.

La opción que se ha considerado más viable es la compra de materia prima ya preparada (subcontratación del proceso de elaboración del material) y el moldeo de la pieza mediante inyección de cerámicos por cuenta del hipotético fabricante. Los motivos por los que se ha optado por dicho camino son:

- La inversión en infraestructura para la obtención de la materia prima es un coste elevado e involucra maquinaria pesada y diversos sectores industriales, lo que eleva demasiado los costes.
- Existen muchos fabricantes y distribuidores, por lo que carece de sentido asumir la responsabilidad de la extracción de la materia prima por cuenta propia.
- Asumir la responsabilidad de un proceso vital al inicio de la cadena puede conllevar la generación de cuellos de botella que compliquen la operativa del resto de procesos.
- La fabricación de la inyección por cuenta propia del fabricante puede reportar grandes beneficios al tratarse de un proceso adaptado a la producción a gran escala, la cual está enfocada a ahorrar costes con niveles de alta productividad, permitiendo mayores beneficios.



Una vez justificada la decisión, se procede a exponer el estudio de los costes y las posibilidades en lo relativo a las ventas.

### A.6.1.1. Capital inicial para la fabricación del blindaje rígido.

Para la puesta en producción bajo el proceso de fabricación de moldeo por inyección de cerámicos (CIM), según los datos de Granta, se estima que se requiere una inversión inicial de 1.600.000,0€, sin embargo, para la productividad que se desea alcanzar se ha supuesto que la inversión será 5 veces superior a lo indicado en la base de datos de Granta, por lo que se ha fijado la inversión inicial total de 8.000.000,0€.

Adicionalmente al proceso CIM, se requiere de maquinaria de sinterizado para completar el proceso. Los costes de este tipo de maquinaria, según D. A. Elkins en su publicación[26], alcanzan los 170.618,0€ aproximadamente. Dado que se ha previsto adquirir 10 máquinas de sinterizado, el coste de esta maquinaria ascendería a 1.706.180,0€

Por lo tanto, finalmente los costes fijos totales son de 9.706.180,0 €. Estos costes comprenden todo el establecimiento de la infraestructura, maquinaria, herramientas, adquisición de moldes, etc...

### A.6.1.2. Materia prima para la fabricación del blindaje rígido.

Para obtener la materia prima, tal y como se ha indicado anteriormente, se ha optado por realizar la compra del producto ya procesado y preparado para su uso en otros procesos de fabricación.

Según James Campbell et al. en su publicación [27], el precio el carburo de boro en polvo ronda los 108€/kg. Dado que cada unidad de blindaje rígido tiene una masa de 1,066 kg, el coste alcanza los 115,13€/unidad fabricada.

### A.6.1.3. Costes variables para la fabricación del blindaje rígido.

Dentro de los costes variables se recogen los costes para el mantenimiento de las herramientas y las instalaciones, el gasto energético, etc...

Para el procesado por inyección, se indica en la base de datos de Granta que se requiere de un gasto para el mantenimiento de las herramientas de 32.100,0€ por cada 1.000.000 de unidades fabricadas. Por otra parte, mediante el uso de una calculadora online, se ha estimado el coste anual del consumo energético para las instalaciones CIM en 88.467,01€. Dado que se ha indicado que la inversión sería 5 veces superior, se va a estimar el mismo criterio para este caso, resultando en un total de 442.335,06 €.

SHOT WEIGHT (G):	<input type="text" value="1066"/>	PLEASE ENTER INTO THESE FOUR BOXES ONLY AND CLICK 'GO'			
CYCLE TIME (SEC):	<input type="text" value="10"/>				
ENERGY CHARGE PER HOUR (£ PER kWh):	<input type="text" value="0.265081"/>				
PRODUCTION HOURS PER YEAR (HRS):	<input type="text" value="2464"/>				
	<input type="button" value="Go"/>				
CYCLES PER HOUR:	360.0				
KG/HOUR:	383.8				
KG/YEAR:	945,584.6				
	ALL ELECTRIC	HYBRID	SERVO MOTOR*	VDP** (circa post 1998)	FDP*** (circa pre 1998)
COST/HOUR:	£30.52	£45.78	£50.86	£66.12	£91.55
COST/YEAR:	£75,196.96	£112,795.43	£125,328.26	£162,926.74	£225,590.87

Ilustración 91. Calculadora de costes energéticos para una fabricación CIM.[28]

De forma adicional, la maquinaria y las instalaciones de sinterizado requieren de un gasto anual de 86.828,0€, según D. A. Elkins en su publicación anteriormente mencionada[26]. Dado que se ha indicado que la inversión

sería 10 veces superior, se va a estimar el mismo criterio para este caso, resultando en un total de 868.280,0€

Finalmente, se ha asumido que los costes variables de energía, mantenimiento e infraestructura van a ser constantes todos los años suponiendo el consumo energético para el máximo ratio de producción. Esto, aun no siendo real porque la producción no se ha estimado que sea a máximos todos los años del estudio económico, supone establecer el criterio más desfavorable para que el modelo de negocio esté preparado para el peor escenario. Dicho coste total resultaría en 1.310.615,06 €.

#### **A.6.1.4. Mano de obra para la fabricación del blindaje rígido.**

El coste de la mano de obra se ha estimado en 28.000,0€ anuales por empleado, lo que equivale a un salario de 2.000,0€ mensuales. Inicialmente se ha previsto contratar 300 empleados para cubrir la producción de la planta de inyección y la de sinterizado, con un incremento anual de un centenar de empleados hasta llegar a un total de 600 empleados el cuarto año.

#### **A.6.1.5. Capacidad de producción del blindaje rígido.**

Según la base de datos del software Granta, la capacidad de producción del proceso de inyección de cerámicos, para la inversión base indicada en el apartado A.6.1.1., alcanza las 360 piezas fabricadas por hora. Aunque la pieza fabricada no presenta una gran complejidad, se ha fijado una capacidad de producción un 50% inferior con respecto a los datos de Granta en concepto producción en condiciones desfavorables, por lo que finalmente se ha fijado la producción en 180 ud/h.

Para una jornada de 8 horas diarias de producción durante 5 días a la semana y 11 meses al año (descontando un mes por los periodos vacacionales), se tienen 1760 horas de producción, por lo que la máxima producción anual será de 316800 unidades.

Se ha estimado que los primeros años de producción no se alcanzará la máxima capacidad hasta conseguir afianzar un buen *know how* y contratar

profesionales con experiencia. Bajo este criterio se ha fijado los siguientes niveles de producción:

- Año 1: 40% de la producción máxima
- Año 2: 60% de la producción máxima
- Año 3: 80% de la producción máxima
- Año 4: 100% de la producción máxima

## A.6.2. Estudio económico para la fabricación del blindaje flexible.

En este apartado se ha realizado un análisis del mismo tipo a lo indicado en el apartado A.6.1. Con respecto a los métodos de fabricación expuestos en el apartado A.5.1.2., se ha tomado la decisión de comprar la materia prima ya preparada (tejido laminar de UHMWPE), la fabricación por cuenta propia del laminado mediante Prepreg (Pre-impregnados), y la subcontratación del corte por chorro de agua. Los motivos por los que se ha optado por dicho camino son:

- La inversión en infraestructura para la fabricación del hilo es un coste elevado e involucra un proceso previo de extrusión de polímeros, lo que eleva demasiado los costes.
- Existen muchos fabricantes y distribuidores, por lo que carece de sentido asumir la responsabilidad de fabricación del hilo y la formación del tejido por cuenta propia.
- La fabricación del laminado por cuenta propia del fabricante no conlleva grandes gastos y puede reportar grandes beneficios por ser un proceso relativamente sencillo pero adaptado a una maquinaria automatizada.

### A.6.2.1. Capital inicial para la fabricación del blindaje flexible.

Para la puesta en producción bajo el proceso de Pre-impregnados se ha planteado que el proceso esté automatizado para conseguir un ratio de producción lo más alto posible. Según la redactora Peggy Malnati, del portal online CompositesWorld[29], el coste para iniciar dicha actividad de forma automatizada puede alcanzar los 2.000.000€. Estos costes comprenden todo el establecimiento de la infraestructura, maquinaria, herramientas, etc...

### A.6.2.2. Materia prima para la fabricación del blindaje flexible.

En el caso del laminado polietileno de ultra alto peso molecular, tal y como se ha indicado anteriormente, se opta por conseguir el material directamente procesado y en formato tela para su posterior unión en forma de laminado.

Dado que la obtención del tejido de UHMWPE de grado militar no se ha encontrado directamente a la venta en ningún distribuidor especializado, se ha tomado el precio del producto más caro (de características inferiores al tejido buscado) de la marca Dyneema y se ha aplicado un factor de sobrecoste del 50% para simular el posible precio del producto buscado. De esta forma, se ha escogido, del portal online *extremtextil*[30], el producto “Dyneema® Composite Fabric + woven, CT5K.18/blkwov4” con un precio de 54,90€/m y se fijado el precio del material buscado en 82,35€/m según el factor de sobrecoste mencionado. Las dimensiones del rollo de tela tienen una amplitud de 1370 mm, lo que implica que, por cada 500 mm de largo se consiguen 2 láminas para el chaleco. Por lo tanto, con 4 m de longitud se consiguen fabricar las 16 capas que se requieren para fabricar un chaleco, por lo que el coste del tejido será de 329,4€/unidad fabricada.

Por otra parte, para la unión del tejido, como se ha indicado en el apartado A.5.1.2.3., se requiere de resina epoxi y catalizador para el curado. El precio de la resina y el catalizador en los portales online de venta al por mayor se encuentra alrededor de los 6,37€/kg para la resina y 3,92€/kg para el catalizador. Se requiere una masa de resina epoxi y catalizador para el curado en cantidades del 35% y el 5% de la masa total de chaleco, respectivamente. Por lo tanto, dado que la masa total del blindaje flexible es de 5,06 kg, se requieren 1,771 kg de resina epoxi y 0,253 kg de agente de curado para el laminado de cada chaleco, por lo que el coste del material para el Prepreg será de 11,28€/unidad fabricada para el epoxi y 0,99€/unidad fabricada para el catalizador.

Finalmente, los costes asociados a los materiales ascienden a 341,67€/unidad fabricada.

### A.6.2.3. Costes variables para la fabricación del blindaje flexible.

En este apartado se recogen los costes para el mantenimiento de las herramientas y las instalaciones, el gasto energético, servicios subcontratados, etc...

En concepto de mantenimiento de maquinaria, infraestructura y gasto energético, se ha fijado el coste anual en un 4% de la inversión inicial, lo que supone un gasto anual de 80.000,0€, el cual se ha supuesto que se mantendrá igual durante los años del estudio económico.

Por otra parte, tal y como se ha mencionado anteriormente, el proceso de corte del chaleco se ha optado por ser subcontratado. Según el fabricante de máquinas de corte por chorro de agua Omax[31], el precio de alquilar dicha maquinaria oscila entre 98€/h y 176€/h, según la precisión requerida, y, dado que no se requieren tolerancias demasiado ajustadas, se ha fijado el coste en 98€/h. Teniendo en cuenta una velocidad de avance de la herramienta de corte de 50 mm/s según lo indicado por los fabricantes, que para el área rectangular de 530x550 mm que comprende cada lámina del chaleco se debe ejecutar un patrón de corte equivalente a 934 mm, y que se pretende cortar los laminados equivalentes a cada chaleco de forma conjunto; cada conjunto de 16 láminas requerirá un tiempo de 18,68 s para ser cortadas por el patrón diseñado, lo que conlleva un coste de 0,51€/unidad fabricada. Para cubrir posibles imprevistos, se ha fijado el coste a 1,02€/unidad fabricada.

### A.6.2.4. Mano de obra para la fabricación del blindaje flexible.

El coste de la mano de obra se ha estimado en 25.200,0€ anuales por empleado, lo que equivale a un salario de 1.800,0€ mensuales. Inicialmente se ha previsto contratar 25 empleados para cubrir la producción de la planta de laminado Prepreg, con un incremento anual de 5 empleados el segundo año y posteriormente un incremento anual de 10 empleados hasta llegar a un total de 50 empleados el cuarto año.

### A.6.2.5. Capacidad de producción del blindaje flexible.

Según la publicación de Marko Szceny et al.[32], el ratio de producción para una fabricación Prepreg automatizada alcanza los 50 kg/h de materiales compuestos fabricados. Teniendo en cuenta que la masa total de blindaje flexible es de 5,06 kg, la capacidad de producción de los laminados de fibra será de 10 chalecos/hora.

Para una jornada de 8 horas diarias de producción durante 7 días a la semana y 11 meses al año (descontando un mes por los periodos vacacionales), se tienen 2464 horas de producción, por lo que la máxima producción anual será de 24640 unidades.

Al igual que se ha expuesto para el caso del blindaje rígido, se ha estimado que los primeros años de producción no se alcanzará la máxima capacidad hasta adquirir los conocimientos suficientes para gestionar eficientemente la producción, sin embargo, se han establecido unos porcentajes superiores en los inicios en comparación a los del caso de del blindaje rígido por la mayor simplicidad del proceso de Pre-impregnados. Bajo este criterio se ha fijado los siguientes niveles de producción:

- Año 1: 60% de la producción máxima
- Año 2: 75% de la producción máxima
- Año 3: 85% de la producción máxima
- Año 4: 100% de la producción máxima

## A.6.3. Cálculo del Valor Actualizado Neto (VAN)

El valor actual neto (VAN) es la diferencia entre el valor actual de las entradas de efectivo y el valor actual de las salidas de efectivo durante un periodo de tiempo. El VAN se utiliza en la elaboración de presupuestos de capital y en la planificación de inversiones para analizar la rentabilidad de una inversión o proyecto previsto. Por lo tanto, es el resultado de los cálculos utilizados para hallar el valor actual de un flujo de pagos futuros[33].

El VAN se calcula de la siguiente forma:

$$\text{VAN} = \sum_{t=0}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

*Ilustración 92. Ecuación del VAN.*

Donde:

$V_t$  representa los flujos de caja en cada periodo  $t$ .

$I_0$  es el valor del desembolso de la inversión inicial.

$n$  es el número de períodos considerados.

$k$  es la tasa de descuento.

Para el cálculo de VAN aplicado a la comercialización del chaleco antibalas diseñado, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- La tasa de descuento se ha fijado al 5% anual de forma estable.
- El número de periodos será igual a 4, momento en el que se ha estimado que la capacidad de producción será máxima.
- Dado que la capacidad de producción de la planta de CIM es muy superior a la planta automatizada de Prepreg (capacidad para aportar blindaje rígido para 158.400 chalecos frente a las 24.640 unidades de blindaje flexible producibles, en términos de máxima producción anual en ambos casos), se ha valorado obtener beneficios con la venta de las placas cerámicas sobrantes.
- Con respecto a lo indicado en el punto anterior, el estudio económico ha separado la fabricación del blindaje flexible de la del blindaje rígido.

### A.6.3.1. Cálculo de costes de fabricación, precio de venta y el VAN.

Para poder establecer un precio de venta para ambos artículos se requiere previamente analizar cuánto cuesta fabricar cada chaleco con tal de venderlos a un precio superior con tal de asumir costes y conseguir beneficios.

Para los casos de ambos artículos, tenemos unos costes de fabricación que incrementan cada año debido al aumento de la producción anual. Por



ejemplo, para el Año 1 en el blindaje flexible se tienen los siguientes costes y producción:

- Producción =  $10 * 2464 * 0,6 = 14.784$  ud/año
- Coste por subcontratación =  $14784 * 1,02 \approx 15.035,66$  €
- Coste por mantenimiento =  $2.000.000 * 0,04 = 80.000$  €
- Coste por materiales =  $341,67 * 14784 \approx 5.051.294,08$  €
- Coste del personal =  $25 * 28.000 = 630.000$  €

Por lo tanto, el coste por cada blindaje flexible fabricado será:

$$\frac{15.035,66 + 80.000 + 5.051.294,08 \text{ €} + 630.000}{14.784} = 390,71 \text{ €/ud}$$

El precio de venta se ha fijado teniendo en cuenta aproximadamente un 30% de beneficios para poder ser competitivo en el mercado, por lo que se debe vender a 500 €.

En el caso del blindaje rígido y para el análisis del Año 1 también, por ejemplo, tenemos:

- Producción =  $180 * 1760 * 0,4 = 126.720$  ud/año
- Coste por herramientas = 0 €, debido a que en ese periodo no se ha superado el umbral de 1.000.000 de unidades fabricadas.
- Coste por mantenimiento =  $442.335,06 + 868.280,00 = 1.310.615,06$  €
- Coste por materiales =  $115,13 * 126.720 \approx 14.589.020,16$  €
- Coste del personal =  $300 * 25.200 = 8.400.000,00$  €

Por lo tanto, el coste por cada blindaje rígido fabricado será:

$$\frac{1.310.615,06 + 14.589.020,16 + 8.400.000,00}{126.720} = 191,76 \text{ €/ud}$$

El precio de venta se ha fijado en un 100% de beneficios, pero con respecto a los datos del periodo 4, que equivale a un 77% de beneficios en el periodo 1, por lo que se debe vender a 340 € y se ha fijado de forma estable para el resto de los periodos analizados.

*Tabla 10. Costes de fabricación según el artículo por cada año del estudio*

	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
Coste de fabricación por placa	191.76 €	180.95 €	175.54 €	172.30 €
Coste de fabricación por chaleco	390.71 €	387.93 €	394.64 €	397.07 €
Coste de fabricación por conjunto	774.23 €	749.82 €	745.72 €	741.66 €

Finalmente, el precio por la venta del artículo final, es decir, el conjunto del blindaje flexible junto con dos placas de refuerzo quedaría en 1.180€.

Tal y como se observa en la Tabla 11, en ambos casos se obtiene un VAN muy positivo al final de la evaluación, lo que implica que son proyectos rentables y se obtienen beneficios al final del periodo estudiado. En el caso del blindaje rígido, se observa que ya se obtienen beneficios desde el primer año, mientras que, en el caso del blindaje flexible, no se obtienen beneficios hasta el segundo año. Se estima que la venta de placas de B4C asociadas al conjunto completo supone un 17,78% del total producido, lo cual implica que se obtendrán 104.646.578,99 € en concepto de venta individual de placas y 28.654.453,79 € en concepto de venta del conjunto blindaje rígido + blindaje flexible.

Se considera que el modelo de negocio es competitivo puesto que en el mercado se encuentran placas de refuerzo de B4C en rangos de precio entre 800 € y 1450 €, [34] y blindajes flexibles de UHMWPE por 500€, [35].

## Anexos

Tabla 11. Cálculo del VAN para ambos artículos.

<b>Blindaje rígido</b>	Inversión inicial	9.706.180,00 €	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
	Producción acumulada		126.720	316.800	570.240	887.040
	Producción anual		126.720	190.080	253.440	316.800
	Coste por herramientas		- €	- €	- €	- €
	Coste por mantenimiento		1.310.615,06 €	1.310.615,06 €	1.310.615,06 €	1.310.615,06 €
	Coste por materiales		14.589.020,16 €	21.883.530,24 €	29.178.040,32 €	36.472.550,40 €
	Ingresos de venta		43.084.800,00 €	64.627.200,00 €	86.169.600,00 €	107.712.000,00 €
	Coste del personal		8.400.000,00 €	11.200.000,00 €	14.000.000,00 €	16.800.000,00 €
	VAN	- 9.706.180,00 €	8.184.453,13 €	36.977.838,56 €	76.673.976,30 €	127.272.866,34 €
<b>Blindaje flexible</b>	Inversión inicial	2.000.000,00 €	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
	Producción anual		14784	18480	20944	24640
	Coste por subcontratación		15.035,66 €	18.794,57 €	21.300,51 €	25.059,43 €
	Coste por mantenimiento		80.000,00 €	80.000,00 €	80.000,00 €	80.000,00 €
	Coste por materiales		5,051,294.08 €	6,314,117.59 €	7,155,999.94 €	8,418,823.46 €
	Ingresos de venta		7,392,000.00 €	9,240,000.00 €	10,472,000.00 €	12,320,000.00 €
	Coste del personal		630.000,00 €	756.000,00 €	1.008.000,00 €	1.260.000,00 €
	VAN	- 2.000.000,00 €	- 461,266.41 €	1,511,198.19 €	3,612,816.81 €	6,028,166.44 €

## A.7. Presupuesto

En este apartado se incluye lo relativo a la presupuestación para el proyecto de fabricación de los diseños realizados durante 4 años, con todo lo que conlleva.

### A.7.1. Cuadro de precios

Presupuesto			
PRESUPUESTO Y MEDICIONES			
CUADRO DE PRECIOS 1			
Nº Actividad	Código	Descripción de las unidades de obra	Precio
01.01	ud	Salario anual de un técnico de fabricación CIM/sinterizado. VENTIOCHO MIL EUROS	28.000,00
01.02	ud	Salario anual de un técnico de fabricación Prepreg automatizada VENTICINCO MIL DOSCIENTOS EUROS	25.200,00
02.01	kg	Polvo de Carburo de Boro CIENTO OCHO EUROS	108,00
02.02	m	Tela de UHMWPE de la marca Dyneema. Para uso balístico OCHENTA Y DOS EUROS CON TREINTA Y CINCO CÉNTIMOS	82,35
02.03	kg	Resina epoxi SEIS EUROS CON TREINTA Y SIETE CÉNTIMOS	6,37
02.04	kg	Agente de curado para resina epoxi TRES EUROS CON NOVENTA Y DOS CÉNTIMOS	3,92
03.01	ud	Coste energético y mantenimiento anual para una máquina de sinterizado OCHENTA Y OCHO MIL SEISCIENTOS EUROS	88.600,00
03.02	ud	Coste energético y mantenimiento anual para la maquinaria CIM y la infraestructura de la planta de fabricación CUATROCIENTOS CUARENTA Y DOS MIL TRESCIENTOS TREINTA Y CINCO EUROS CON SEIS CENTIMOS	442.335,06
03.03	ud	Coste energético y mantenimiento anual para la maquinaria Prepreg OCHENTA MIL EUROS	80.000,00

## Anexos

---

04.01		Construcción de la planta de fabricación CIM y sinterizado, adquisición de maquinaria de inyección de cerámicos OCHO MILLONES DE EUROS	8.000.000 ,00
04.02		Maquinaria de sinterizado CIENTO SETENTA MIL SEISCIENTOS DIECIOCHO EUROS	170.618,0 0
04.03	ud	Adquisición de un taller automatizado de fabricación Prepreg con maquinaria incluida DOS MILLONES DE EUROS	2.000.000 ,00
05.01	h	Alquiler de maquina de corte por chorro de agua NOVENTA Y OCHO EUROS	98,00

20 de Julio de 2022

## A.7.2. Presupuesto y mediciones

# Anexos

Presupuesto	
MEDICIONES Y PRESUPUESTO	

N.º Orden	Descripción de las unidades	Medición	Precio	Importe
-----------	-----------------------------	----------	--------	---------

## 01 MANO DE OBRA

01.01	ud Salario anual de un técnico de fabricación CIM/sinterizado.	1.800,00	28.000,00€	50.400.000,00 €
01.02	ud Salario anual de un técnico de fabricación Prepreg automatizada	145	25.200,00€	3.654.000,00 €

## 02 MATERIALES

02.01	kg Polvo de Carburo de Boro	945.584,64	108,00 €	102.123.141,12 €
02.02	m Tela de UHMWPE de la marca Dyneema. Para uso balístico	78.848,00	82,35 €	26.940.235,07 €
02.03	kg Resina epoxi	139.639,81	6,37 €	889.505,58 €
02.04	kg Agente de curado para resina epoxi	19.948,54	3,92 €	78.198,29 €

## 03 COSTE ENERGÉTICO Y MANTENIMIENTO

03.01	ud Coste energético y mantenimiento anual para una máquina de sinterizado	40,00	88.600,00€	3.473.120,00 €
03.02	ud Coste energético y mantenimiento anual para la maquinaria CIM y la infraestructura de la planta de fabricación	4	442.335,06 €	1.769.340,22 €
03.03	ud Coste energético y mantenimiento anual para la maquinaria Prepreg	4	80.000,00 €	320.000,00 €

# Anexos

Presupuesto	
MEDICIONES Y PRESUPUESTO	

N.º Orden	Descripción de las unidades	Medición	Precio	Importe
-----------	-----------------------------	----------	--------	---------

## 04 MAQUINARIA E INFRAESTRUCTURA

04.01	ud	Construcción de la planta de fabricación CIM y sinterizado, adquisición de maquinaria de inyección de cerámicos	1,00	8.000.000,00 €	8.000.000,00 €
04.02	ud	Maquinaria de sinterizado	10,00	170.618,00 €	1.706.180,00 €
04.03	ud	Adquisición de un taller automatizado de fabricación Prepreg con maquinaria incluida	1	2.000.000,00 €	2.000.000,00 €

## 05 SERVICIOS SUBCONTRATADOS

05.01	h	Alquiler de maquina de corte por chorro de agua	818,27	98,00€	80.190,17 €
-------	---	---	--------	--------	-------------

01	1.1	MANO DE OBRA			54.054.000,00 €
02	1.2	MATERIALES			129.063.376,19 €
03	1.3	COSTE ENERGÉTICO Y MANTENIMIENTO			5.562.460,22 €
04	1.4	MAQUINARIA E INFRAESTRUCTURA			11.706.180,00 €
05	1.5	SERVICIOS SUBCONTRATADOS			80.190,17 €

**TOTAL PRESUPUESTO C/IVA..... 200.466.206,58€**

Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:

**DOSCIENTOS MILLONES CUATROCIENTOS SESENTA Y SEIS MIL DOSCIENTOS SEIS EUROS CON CINCUENTA Y OCHO CENTIMOS.**

20 de Julio de 2022

# A.8. Bibliografía

- [1] S. A. Walton and A. Williams, "The Knight and the Blast Furnace: A History of the Metallurgy of Armour in the Middle Ages and the Early Modern Period," *The Sixteenth Century Journal*, vol. 35, no. 3, p. 851, Oct. 2004, doi: 10.2307/20477066.
- [2] "KEVLAR® ARAMID FIBER TECHNICAL GUIDE".
- [3] M. Lewin, S. B. Sello, and J. Preston, "Handbook of fiber science and technology: High technology fibers," no. vol.~3,ptie.~4, 1996, Accessed: Jul. 28, 2022. [Online]. Available: [http://books.google.fr/books?id=mrG3q9h\\_XYC](http://books.google.fr/books?id=mrG3q9h_XYC)
- [4] "El Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular." <https://todoenpolimeros.com/2017/08/07/polietileno-de-ultra-alto-peso-molecular/> (accessed Jul. 28, 2022).
- [5] "Protective Armor." [https://www.dsm.com/dyneema/en\\_GB/applications/protective-armor.html](https://www.dsm.com/dyneema/en_GB/applications/protective-armor.html) (accessed Jul. 28, 2022).
- [6] J. Naveen, K. Jayakrishna, M. T. bin Hameed Sultan, and S. M. M. Amir, "Ballistic Performance of Natural Fiber Based Soft and Hard Body Armour- A Mini Review," *Frontiers in Materials*, vol. 7, p. 440, Dec. 2020, doi: 10.3389/FMATS.2020.608139/BIBTEX.
- [7] "Ballistic Vest Review." <https://web.archive.org/web/20110713131543/http://tigerflare.com/component/content/article/1-latest-news/351-ballistic-vest-review> (accessed Jul. 28, 2022).
- [8] R. Scazzosi, M. Giglio, and A. Manes, "Experimental and numerical investigation on the perforation resistance of double-layered metal shield under high-velocity impact of armor-piercing projectiles," *Materials*, vol. 14, no. 3, pp. 1-20, Feb. 2021, doi: 10.3390/ma14030626.
- [9] "Conversión aproximada de dureza | Helion Tools." <https://helion.tools/es/p/tablas/conversion-aproximada-de-dureza-7-44> (accessed Jul. 27, 2022).
- [10] T. J. Holmquist, A. M. Rajendran, D. W. Templeton, and K. D. Bishnoi, "A Ceramic Armor Material Database "3 >".
- [11] "6B45 'Granit' Gost 5A/6A Russian body armor ballistic test - Standardized Ceramics for the Russians - YouTube." <https://www.youtube.com/watch?v=Ywlf6uaDvjQ> (accessed Jul. 27, 2022).



## Anexos

- [12] A. G. Kolmakov, I. O. Bannykh, V. I. Antipov, L. v. Vinogradov, and M. A. Sevost'yanov, "Materials for Bullet Cores," *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2021, no. 4, pp. 351–362, Apr. 2021, doi: 10.1134/S0036029521040133.
- [13] Z. Shen, D. Hu, Y. Zhang, Q. Cai, and X. Han, "Continuous twice-impacts analysis of UHMWPE laminate fixed with bolted joints," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 109, pp. 293–301, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.07.013.
- [14] L. H. Nguyen, T. R. Lässig, S. Ryan, W. Riedel, A. P. Mouritz, and A. C. Orifici, "Numerical modelling of ultra-high molecular weight polyethylene composite under impact loading," in *Procedia Engineering*, 2015, vol. 103, pp. 436–443. doi: 10.1016/j.proeng.2015.04.043.
- [15] T. Lässig *et al.*, "A non-linear orthotropic hydrocode model for ultra-high molecular weight polyethylene in impact simulations," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 75, pp. 110–122, 2015, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.004.
- [16] "Stanag 2920 | PDF." <https://es.scribd.com/document/412749891/Stanag-2920> (accessed Jul. 27, 2022).
- [17] "BOE.es - BOE-A-2007-22059 Resolución 320/38217/2007, de 10 de diciembre, de la Dirección General de Armamento y Material, por la que se acredita a la Asociación de Investigación de la Industria Textil como laboratorio de ensayos para procesos de homologación." [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2007-22059](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2007-22059) (accessed Jul. 27, 2022).
- [18] U. Department of Justice, O. of Justice Programs, and N. Institute of Justice, "Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06." [Online]. Available: [www.ojp.usdoj.gov/nij](http://www.ojp.usdoj.gov/nij)
- [19] "Application of Boron Carbide Ceramics in Defence and Military." <https://www.vacfurnace.com/technology-frontiers/application-of-boron-carbide-ceramics-in-defence-and-military/> (accessed Jul. 27, 2022).
- [20] C. Hu *et al.*, "Developments in hot pressing (HP) and hot isostatic pressing (HIP) of ceramic matrix composites," *Advances in Ceramic Matrix Composites: Second Edition*, pp. 177–202, 2014, doi: 10.1016/B978-0-08-102166-8.00008-6.
- [21] M. v. Witzleben and T. Moritz, "Ceramic Injection Molding," *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, vol. 1–3, pp. 179–188, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-818542-1.00072-2.
- [22] G. I. Kalandadze, S. O. Shalamberidze, and A. B. Peikrishvili, "Sintering of boron and boron carbide," *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 154, no. 1, pp. 194–198, 2000, doi: 10.1006/JSSC.2000.8835.

## Anexos

---

- [23] "ADHESIVES for UHMW." <https://www.reltekllc.com/adhesivesforuhmw.aspx> (accessed Jul. 27, 2022).
- [24] L. Han, H. Cai, X. Chen, C. Zheng, and W. Guo, "Study of UHMWPE fiber surface modification and the properties of uhmwpe/epoxy composite," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/POLYM12030521.
- [25] "waterjets.org - The most complete waterjet resource on the web - About waterjets." [https://web.archive.org/web/20100226103801/http://www.waterjets.org/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=4&id=46&Itemid=53](https://web.archive.org/web/20100226103801/http://www.waterjets.org/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=4&id=46&Itemid=53) (accessed Jul. 27, 2022).
- [26] "Estimated Cost of Exploiting Enriched, Hard Manganese Ore from the Maggie ... - Douglas A. Elkins - Google Libros." (accessed Jul. 28, 2022).
- [27] J. Campbell *et al.*, "NOVEL PROCESSING OF BORON CARBIDE (B<sub>4</sub>C): PLASMA SYNTHESIZED NANO POWDERS AND PRESSURELESS SINTERING FORMING OF COMPLEX SHAPES".
- [28] "Moulding Machine Energy Consumption Calculator | PlastikCity." <https://www.plastikcity.co.uk/useful-stuff/energy-consumption-calculator> (accessed Jul. 27, 2022).
- [29] "Lower cost, less waste: Inline prepreg production | CompositesWorld." <https://www.compositesworld.com/articles/lower-cost-less-waste-inline-prepreg-production> (accessed Jul. 27, 2022).
- [30] "Dyneema® Composite Fabric + woven, CT5K.18/blkwov4, 102g/sqm - Jetzt online kaufen | extremtextil." <https://www.extremtextil.de/en/dyneema-composite-fabric-woven-ct5k18-blkwov4-102g-sqm.html> (accessed Jul. 27, 2022).
- [31] "Precios y Costes de las Máquinas de Corte de Agua | OMAX." <https://www.omax.com/es/maquina-de-corte-de-agua/maquina-de-corte-de-agua-precio-y-costos.html> (accessed Jul. 27, 2022).
- [32] M. Szesny, F. Heieck, S. Carosella, P. Middendorf, H. Sehrsön, and M. Schneiderbauer, "The advanced ply placement process—an innovative direct 3D placement technology for plies and tapes," *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science*, vol. 3, no. 1. Taylor and Francis Ltd., pp. 2-9, Jan. 02, 2017. doi: 10.1080/20550340.2017.1291398.
- [33] "Valor actual neto (VAN) - Qué es, definición y significado | 2022 | Economipedia." <https://economipedia.com/definiciones/valor-actual-neto.html> (accessed Jul. 27, 2022).

## Anexos

---

- [34] "SAPI Plates: Level III+ - Hoplite Armor Store." <https://www.hoplitearmor.com/collections/sapi-plates-level-iii-1> (accessed Jul. 27, 2022).
- [35] "Dyneema body armour, tactical ballistic vests." <http://www.body-armour-protection.co.uk/dyneema-tactical-body-armour-vest.html> (accessed Jul. 27, 2022).