



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo Fin de Grado

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica

Fabricación, ensayo y simulación de componentes mecánicos  
en material compuesto

Manufacturing, testing and simulation of mechanical components made of  
composite materials

Autor: Juan Gómez Nieto

Junio de 2023





# Resumen

En este Trabajo fin de Grado se presenta el diseño de una maneta de freno para motocicletas utilizando material compuesto. El material está formado por una resina epoxi reforzada con fibras cortas de carbono, orientadas de manera aleatoria. El objetivo principal del estudio es evaluar las ventajas e inconvenientes que ofrece este material frente al uso tradicional del aluminio.

Primeramente, se han fabricado varias probetas de material compuesto con distintos contenidos de fibra y se han ensayado experimentalmente frente a cargas de tracción y de impacto. Posteriormente, se han comparado los resultados obtenidos con los del aluminio. Los resultados indican que el material compuesto reforzado con fibra de carbono es más resistente que el aluminio, aunque presenta una menor ductilidad.

Una vez obtenidas las propiedades del material, se ha diseñado una maneta de freno y se ha simulado su comportamiento estático en servicio mediante el método de los elementos finitos. Finalmente, se ha fabricado la pieza y se ha montado en una motocicleta.

El estudio permite concluir que este tipo de material compuesto, tanto por sus propiedades mecánicas como por la flexibilidad del proceso de fabricación, supone una posible alternativa al uso del aluminio.

## **Abstract**

This Bachelor's thesis presents the design of a brake lever for motorcycles using composite material. The material consists of an epoxy resin reinforced with randomly oriented short carbon fibres. The main objective of the study is to evaluate the advantages and disadvantages offered by this material compared to the traditional use of aluminium.

Firstly, several composite material specimens were manufactured with different fibre contents and experimentally tested under tensile and impact loads. Subsequently, the results obtained were compared with those of aluminium. The results indicate that the carbon fibre-reinforced composite material is stronger than aluminium but exhibits lower ductility.

Once the material properties were obtained, a brake lever was designed, and its static behaviour in service was simulated using the finite element method. Finally, the component was fabricated and installed on a motorcycle.

The study allows us to conclude that this type of composite material, both due to the flexibility of the manufacturing process and its mechanical properties, represents an interesting alternative to the use of aluminium.



*Quiero agradecer a mis padres, sin su paciencia y consejos no hubiera llegado hasta aquí. Desde pequeño me han inculcado lo importante que es ser buena persona y saber sacrificarse para alcanzar mis metas.*

*También quiero expresar mi agradecimiento a D. Raúl Muñoz Sánchez por haber creído en mí para la realización de este proyecto y haberme guiado a lo largo de todo el proceso. Su paciencia, conocimientos y disposición constante son parte del logro de este trabajo.*

*“Si decides hacer solo las cosas que sabes que van a funcionar;  
dejaras un montón de oportunidades encima de la mesa”*  
Jeff Bezos



## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. <i>Abreviaturas</i> .....	XVII
Tabla 2. <i>Clasificación de las resinas termoestables en</i> .....	25
Tabla 3. <i>Termoplásticos más comunes</i> .....	26
Tabla 4. <i>Propiedades de matrices poliméricas más utilizadas</i> .....	28
Tabla 5. <i>Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas</i> .....	28
Tabla 6. <i>Propiedades de la fibra de vidrio</i> .....	32
Tabla 7. <i>Propiedades de la fibra de carbono</i> .....	33
Tabla 8. <i>Propiedades de las fibras de kevlar</i> .....	33
Tabla 9. <i>Características técnicas fibra empleada</i> .....	47
Tabla 10. <i>Características técnicas resina Epoxi</i> .....	48
Tabla 11. <i>Características técnicas Aluminio AW 5005</i> .....	49
Tabla 12. <i>Dimensiones de las probetas en ensayo de tracción (ASTM D3039)</i> .....	49
Tabla 13. <i>Datos probetas</i> .....	55
Tabla 14. <i>Características técnicas máquina tracción</i> .....	73
Tabla 15. <i>Tipos de probetas ensayo de tracción</i> .....	73
Tabla 16. <i>Características probetas CFRP 60</i> .....	74
Tabla 17. <i>Características probetas CFRP 40</i> .....	74
Tabla 18. <i>Características probetas Aluminio AW-5005</i> .....	74
Tabla 19. <i>Características péndulo de Charpy</i> .....	78
Tabla 20. <i>Características de las probetas ensayadas frente a impacto</i> .....	79
Tabla 21. <i>Características probetas CFRP 60</i> .....	80
Tabla 22. <i>Características probetas CFRP 40</i> .....	80

Tabla 23. <i>Características probetas Aluminio AW-5005</i> .....	80
Tabla 24. <i>Resultados ensayos de tracción CFRP 60</i> .....	84
Tabla 25. <i>Resultados ensayo de tracción CFRP 40</i> .....	85
Tabla 26. <i>Resultados de los ensayos de tracción del Aluminio</i> .....	87
Tabla 27. <i>Resultados del módulo elástico, la tensión de rotura y la deformación de rotura en función del tipo de material.</i> .....	88
Tabla 28. <i>Resultados de la tensión de rotura y el peso de las probetas.</i> .....	89
Tabla 29. <i>Resultados ensayo de Charpy CFRP 60</i> .....	90
Tabla 30. <i>Resultados ensayo de Charpy CFRP 40</i> .....	91
Tabla 31. <i>Resultados ensayo de Charpy Aluminio</i> .....	92
Tabla 32. <i>Resultados ensayo de Charpy Aluminio con entalla</i> .....	93
Tabla 33. <i>Resultados ensayo de Charpy</i> .....	94
Tabla 34. <i>Propiedades materiales del material compuesto en función de la fracción volumétrica de fibras.</i> .....	98
Tabla 35. <i>Propiedades material Aluminio</i> .....	99
Tabla 36. <i>Fuerza de los dedos (Joel A &amp; Jim R, 2011)</i> .....	103
Tabla 37. <i>Simulaciones</i> .....	107
Tabla 38. <i>Resultados simulación</i> .....	111
Tabla 39. <i>Resultados simulaciones</i> .....	120
Tabla 40. <i>Resultados simulaciones</i> .....	126
Tabla 41. <i>Resultados simulaciones</i> .....	128

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Uso de materiales compuestos en los aviones Boeing 787 y Airbus A350.....	18
Figura 2. Proceso de fabricación de preimpregnados .....	23
Figura 3. (A) <i>Fibras continuas</i> (B) <i>Tejido</i> (C) <i>Laminado</i> .....	30
Figura 4. <i>Esquema de un laminado</i> .....	36
Figura 5. a) <i>Proceso de fabricación Laminado a mano.</i> b) <i>Proceso de fabricación Filament Winding</i> .....	38
Figura 6. <i>Autoclave utilizado en la industria aeronáutica</i> .....	39
Figura 7. <i>Proceso de fabricación Pultrusión</i> .....	40
Figura 8. <i>Proceso de fabricación SMC</i> .....	41
Figura 9. <i>Máquina de impacto por caída vertical</i> .....	46
Figura 10. <i>Máquina de impacto pendular Charpy diseñada en la propia ETS de Ingeniería Industrial de Béjar.</i> .....	46
Figura 11. <i>Dimensiones probeta</i> .....	50
Figura 12. <i>Diseño molde 1</i> .....	52
Figura 13. <i>Molde 1 fabricado</i> .....	53
Figura 14. <i>Diseño final</i> .....	53
Figura 15. <i>Molde final fabricado</i> .....	53
Figura 16. <i>Molde acabado final</i> .....	56
Figura 17. <i>Balanza de precisión</i> .....	57
Figura 18. <i>Puesta a cero del recipiente en balanza</i> .....	58
Figura 19. <i>Pesaje de la fibra</i> .....	58
Figura 20. <i>Pesaje de la resina</i> .....	59

Figura 21. <i>Ensamblaje del molde</i> .....	60
Figura 22. <i>Realización de la mezcla en el molde</i> .....	61
Figura 23. <i>Colocación del molde en el tornillo de banco</i> .....	62
Figura 24. <i>Excedente de resina</i> .....	63
Figura 25. <i>Probeta recién sacada del molde</i> .....	64
Figura 26. <i>Recorte de bordes</i> .....	65
Figura 27. <i>Corte probetas de aluminio</i> .....	66
Figura 28. <i>Diseño de la maneta en Inventor</i> .....	67
Figura 29. <i>Impresión de los moldes</i> .....	68
Figura 30. <i>Preparación de los moldes, la fibra y la resina</i> .....	69
Figura 31. <i>Colocación de la fibra y la resina en el molde</i> .....	69
Figura 32. <i>Colocación del molde en el tornillo de banco</i> .....	70
Figura 33. <i>Desmoldeo</i> .....	71
Figura 34. <i>Maneta extraída del molde sin operaciones de acabado</i> .....	71
Figura 35. <i>Lijado de la maneta</i> .....	72
Figura 36. <i>Maneta acabada</i> .....	72
Figura 37. <i>Colocación de la probeta en la máquina de tracción</i> .....	76
Figura 38. <i>Ensayo probeta de aluminio</i> .....	77
Figura 39. <i>Péndulo de Charpy</i> .....	79
Figura 40. <i>Colocación de la probeta en el péndulo de Charpy</i> .....	81
Figura 41. <i>Probeta después de ensayo de Charpy</i> .....	93
Figura 33. <i>Maneta de freno</i> .....	97
Figura 34. <i>Esquema de la maneta sin accionar</i> .....	100

Figura 35. <i>Esquema de la maneta accionada</i> .....	100
Figura 36. <i>Condiciones de contorno</i> .....	101
Figura 37. <i>Condiciones de contorno</i> .....	102
Figura 38. <i>Estudio fuerza de los dedos</i> .....	102
Figura 39. <i>Condiciones de contorno. Carga</i> .....	104
Figura 40. <i>Condiciones de contorno. Carga dos dedos</i> .....	104
Figura 41. <i>Mallado de la pieza</i> .....	106
Figura 42. <i>Módulo Step</i> .....	108
Figura 43. <i>Tensiones máximas modelo con un dedo</i> .....	109
Figura 44. <i>Desplazamiento máximo con un dedo</i> .....	110
Figura 45. <i>Tensiones máximas modelo con dos dedos</i> .....	110
Figura 46. <i>Desplazamiento máximo modelo con dos dedos</i> .....	111
Figura 47. <i>Simulación CFRP_60_L_5_2D</i> .....	112
Figura 48. <i>Simulación CFRP_60_L_3_2D</i> .....	113
Figura 49. <i>Simulación CFRP_60_L_2_2D</i> .....	114
Figura 50. <i>Simulación CFRP_60_L_1_2D</i> .....	115
Figura 51. <i>Simulación CFRP_60_C_5_2D</i> .....	116
Figura 52. <i>Simulación CFRP_60_C_3_2D</i> .....	117
Figura 53. <i>Simulación CFRP_60_C_2_2D</i> .....	118
Figura 54. <i>Simulación CFRP_60_C_1_2D</i> .....	119
Figura 55. <i>Simulación CFRP 60. Tensiones</i> .....	122
Figura 56. <i>Simulación CFRP 60. Tensiones</i> .....	123
Figura 57. <i>Simulación CFRP 60. Desplazamiento</i> .....	123

Figura 58. <i>Simulación CFRP 40. Tensiones</i> .....	124
Figura 59. <i>Simulación CFRP 40. Tensiones</i> .....	124
Figura 60. <i>Simulación CFRP 40. Desplazamiento</i> .....	125
Figura 61. <i>Simulación Aluminio. Tensiones</i> .....	127
Figura 62. <i>Simulación Aluminio. Desplazamiento</i> .....	127
Figura 63. <i>Zona tensión máxima</i> .....	128

## Contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>18</b>
1.1	Motivación.....	18
1.2	Objetivos y alcance.....	19
1.3	Contenidos .....	20
<b>2</b>	<b>MATERIALES COMPUESTOS .....</b>	<b>21</b>
2.1	Introducción histórica.....	21
2.2	Tipologías.....	24
2.2.1	Matrices.....	24
2.2.2	Refuerzos.....	29
2.3	Métodos de fabricación.....	36
2.3.1	Procesos de molde abierto.....	36
2.3.2	Procesos de molde cerrado.....	39
2.4	Ensayos.....	42
2.4.1	Ensayo de tracción.....	42
2.4.2	Ensayo de impacto de baja velocidad.....	43
<b>3</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODO DE FABRICACIÓN .....</b>	<b>47</b>
3.1	Materiales.....	47
3.1.1	Fibra de carbono.....	47
3.1.2	Aluminio.....	48
3.2	Fabricación de las probetas de fibra de carbono.....	49
3.2.1	Diseño del molde.....	50
3.2.2	Fracción volumétrica.....	54
3.2.3	Fabricación.....	56

3.3	Fabricación de las probetas de aluminio .....	66
3.4	Fabricación de la maneta en fibra de carbono .....	67
<b>4</b>	<b>CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MATERIALES .....</b>	<b>73</b>
4.1	Ensayos de tracción.....	73
4.2	Ensayo de Charpy .....	78
4.3	Resultados ensayo de tracción.....	83
4.3.1	Probetas de fibra de carbono (Vf=60%) .....	83
4.3.2	Probetas de fibra de carbono (Vf=40%) .....	84
4.3.3	Probetas de Aluminio.....	86
4.3.4	Comparación entre fibra de carbono y aluminio .....	87
4.4	Resultados de los ensayos de impacto .....	89
4.4.1	Fibra de carbono (Vf=60%) .....	89
4.4.2	Fibra de carbono (Vf=40%) .....	90
4.4.3	Aluminio.....	92
4.4.4	Comparación fibra de carbono y aluminio.....	94
<b>5</b>	<b>SIMULACIONES .....</b>	<b>96</b>
5.1	Descripción del modelo .....	96
5.1.1	Geometría.....	97
5.1.2	Materiales .....	98
5.1.3	Condiciones de contorno.....	99
5.1.4	Mallado.....	105
5.1.5	Algoritmo de cálculo (Solver) .....	107
5.2	Resultados simulación.....	109
5.2.1	Solicitud más desfavorable .....	109
5.2.2	Análisis de sensibilidad de malla.....	111
5.2.3	Simulación CFRP (Vf=60%).....	122

5.2.4	Simulación CFRP ( $V_f=40\%$ ).....	124
5.2.5	Comparación CFRP 60 y CFRP 40.....	126
5.2.6	Simulación de la maneta fabricada en aluminio.....	127
5.2.7	Comparación CFRP ( $V_f=60\%$ ) y Aluminio.....	128
<b>6</b>	<b>PRESUPUESTO ECONÓMICO .....</b>	<b>130</b>
6.1	Capítulo I. Materiales.....	130
6.2	Capítulo II. Equipamiento.....	130
6.3	Capítulo III. Mano de obra .....	131
6.4	Capítulo IV. Resumen.....	131
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>132</b>
<b>8</b>	<b>TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>133</b>
	<b>APÉNDICE A.....</b>	<b>134</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>139</b>

## ABREVIATURAS

Abreviaturas	Significado
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
SMC	Sheet Moulding Compound
PMC	Polymer Matrix Composites
MMC	Metal Matrix Composites
CMC	Ceramic Matrix Composites
C/C	Carbon Composites
TFG	Trabajo Fin de Grado
HM	High Modulus
HR	High Resistance

**Tabla 1.** *Abreviaturas*

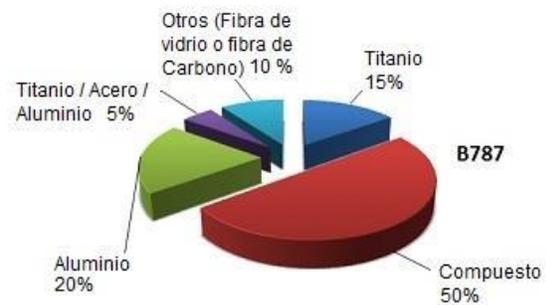
# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

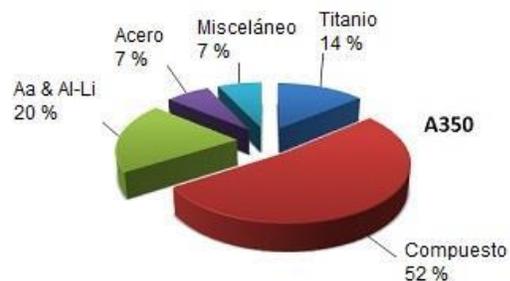
Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras continuas tienen actualmente gran importancia en la industria. Esto se debe fundamentalmente a sus excelentes propiedades mecánicas (resistencia a la fatiga, rigidez y resistencia específicas) y a su comportamiento frente a la corrosión, lo que ha permitido que gran cantidad de sectores apuesten por su desarrollo. Así, podemos encontrar el uso de estos materiales en la industria aeroespacial, aeronáutica, automóvil, naval, en la construcción e incluso en los deportes.

En el sector del transporte y, concretamente, en el sector aeronáutico estos materiales han sustituido en gran número de aplicaciones a los materiales estructurales convencionales como el acero o las aleaciones de aluminio. En la Figura 1 se observa la importancia que tienen estos materiales en dos aviones actuales, como son el Boeing 787 y el Airbus A350.

**Boeing 787**



**Airbus A350**



**Figura 1.** Uso de materiales compuestos en los aviones Boeing 787 y Airbus A350.

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras continuas se presentan habitualmente en forma de laminados, es decir, de láminas apiladas unas sobre otras y unidas entre sí mediante una resina. La principal ventaja de esta configuración es que permite orientar las fibras en la dirección principal del esfuerzo al cual está sometida la estructura, lo que a su vez reduce sensiblemente la cantidad de material necesario y, con ello, el peso del componente estructural.

La principal desventaja de estos materiales es su alto coste debido, sobre todo, al elevado precio de la materia prima, los métodos de fabricación y la alta cualificación necesaria para llevar a cabo el proceso de diseño. La fabricación de laminados de alta calidad requiere el uso de autoclaves, cuyo coste es muy elevado,

Una alternativa mucho más económica y flexible es el uso de materiales compuestos a base de fibras cortas. Si bien las propiedades mecánicas finales no son tan buenas como en el caso de los laminados, se trata de un proceso de fabricación sencillo, que permite fabricar piezas con formas complejas sin necesidad de equipos avanzados ni de personal altamente cualificado.

## 1.2 Objetivos y alcance

El objetivo de este trabajo fin de grado es diseñar una maneta de freno de una motocicleta mediante un material compuesto formado por fibras cortas de carbono y una resina epoxi, curados en un molde. Para ello se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- Fabricación de las probetas del material compuesto del que se fabricará la maneta.
- Caracterización experimental, mediante ensayos de tracción y de impacto, de dichas probetas.
- Evaluación de la influencia de la fracción volumétrica de fibras en las propiedades mecánicas del material compuesto.
- Comparación de las propiedades mecánicas con las del aluminio.
- Simulación mediante el método de los elementos finitos de la maneta de freno frente a cargas estáticas, tanto en material compuesto como en aluminio.
- Fabricación y montaje de la maneta de freno en material compuesto.

### 1.3 Contenidos

El documento se ha estructurado en ocho capítulos:

- En el capítulo 1, se explican los motivos que han llevado a realizar el proyecto y se da una breve introducción de lo que va a tratar el mismo.
- En el capítulo 2, se realiza una descripción histórica de lo que es un material compuesto, los principales tipos que existen, los tipos de materia prima que se utilizan, y los tipos de ensayos y simulaciones que se realizan en estos materiales.
- En el capítulo 3, se describe el proceso de fabricación llevado a cabo a lo largo del proyecto, explicando las operaciones de diseño, fabricación de moldes; se comentan también los problemas y contratiempos que aparecieron. Se realiza una explicación de las fracciones volumétricas y se explica detalladamente el proceso de confección de las probetas.
- El capítulo 4, se describen los ensayos mecánicos llevados a cabo y se realiza un análisis de los resultados obtenidos de los mismos.
- En el capítulo 5, se describe el proceso seguido para la realización de las simulaciones y posteriormente se muestran y analizan los resultados obtenidos.
- El capítulo 6 recoge el presupuesto económico de este proyecto.
- Las conclusiones más relevantes se presentan en el capítulo 7.
- En el capítulo 8 se plantean posibles trabajos futuros relacionados con este proyecto.
- Finalmente, se incluye un apéndice con los planos de las piezas.

## 2 MATERIALES COMPUESTOS

Un material compuesto es aquel formado por dos o más componentes, de manera que las propiedades del conjunto sean superiores a las de los componentes por separado. Además de lo anterior, debe cumplir los siguientes requisitos:

- Debe ser un material fabricado por el ser humano.
- No debe existir ninguna reacción química entre los componentes.
- Debe tratarse de un material heterogéneo.
- Debe denominarse material avanzado.

Debido a estas consideraciones, no se puede considerar como material compuesto a los siguientes materiales:

- Los materiales naturales como los que componen nuestros huesos (Miravete & Castejón, 2007).
- Otros materiales tradicionales como el hormigón o las aleaciones metálicas.

### 2.1 Introducción histórica

Los materiales compuestos existen desde hace más de 3000 años. Ya en Egipto y Mesopotamia usaban una mezcla de barro y paja para crear ladrillos de adobe resistentes y duraderos. Cualquiera de estos materiales por separado no es capaz de aguantar el peso de un edificio, pero si los dos materiales los mezclamos de manera uniforme, dan como resultado un ladrillo resistente. En este caso, los dos componentes son el barro, que hace de matriz y tiene buena resistencia a la compresión, y la paja, que tiene buena resistencia a esfuerzos de tracción, la cual actúa como material de refuerzo. Por lo tanto, este material es considerado como uno de los primeros materiales compuestos.

La civilización mongólica, hacia el 1200 d.C, inventó los arcos de material compuesto. Estaban fabricados mediante una combinación de bambú, que le daba flexibilidad, y resina de pino, que le proporcionaba rigidez. Así consiguieron hacer unos arcos ligeros pero rígidos y resistentes.

Sin embargo, no es hasta principios del siglo XX cuando se genera un gran interés por los materiales compuestos.

En 1907, el químico belga Leo Baekeland creó la primera resina termoestable. Baekeland calentó y aplicó presión en un recipiente especial a un fenol y un formaldehído para obtener una resina líquida que polimerizó y tomó la forma del recipiente. Esta resina tomó el nombre de bakelita (Miravete & Castejón, 2007). A lo largo de la primera mitad del siglo, van apareciendo el resto de las matrices conocidas: las fenólicas, las poliéster, las vinilésteres y las epoxis.

A medida que se iban desarrollando las resinas, se comenzaba a hacer uso de las fibras, las cuales eran conocidas con anterioridad. Así aparecieron los primeros materiales compuestos como las fibras de vidrio combinadas con matrices fenólicas y poliésteres para multitud de aplicaciones dentro del industria naval y eléctrica.

Los primeros métodos de fabricación se desarrollaron alrededor de 1930 y consistían en un moldeado por contacto a mano. En 1940 aparecieron las primeras inyectoras de matrices termoestables, y en 1951 se patentan los primeros procesos automatizados como la pultrusión. Esto permitió la fabricación de perfilería para una gran cantidad de sectores. Este avance consiguió ofrecer fiabilidad a los procesos de fabricación de materiales compuestos.

A lo largo de esta década aparecieron nuevos métodos de fabricación como el SMC (sheet molding compound), el cual consiste en impregnar con resina de poliéster fibras de vidrio, cuya mezcla se conforma en una prensa a temperatura elevada. Este es uno de los procesos que se sigue utilizando hoy en día, Figura 2.

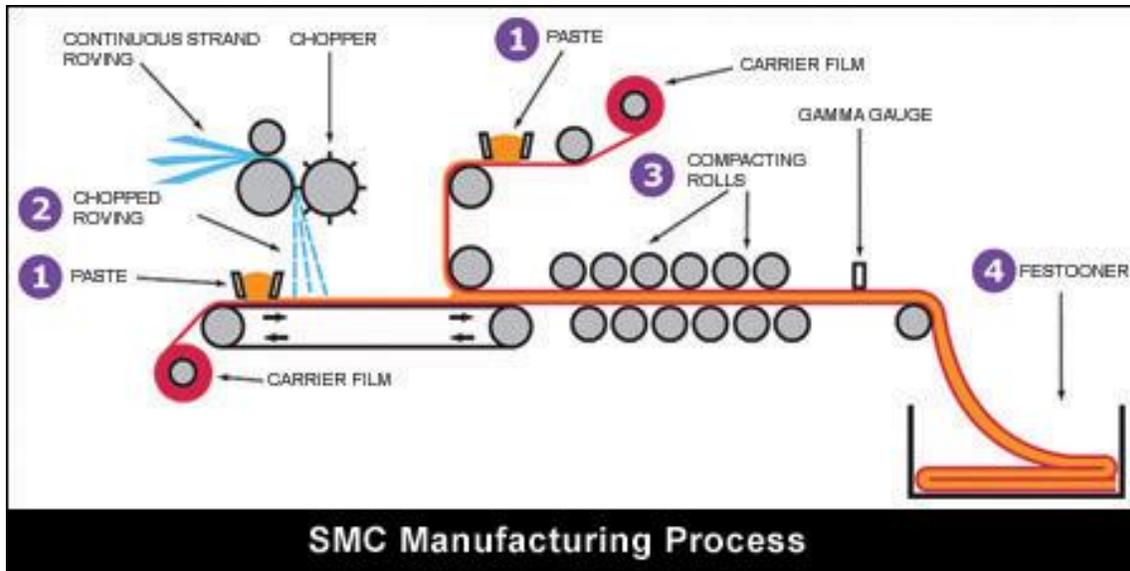


Figura 2. Proceso de fabricación de preimpregnados

A lo largo de la década de 1960, toman popularidad en Estados Unidos las fibras avanzadas: carbono, boro y aramida. Se empezó a implementar su uso en el ámbito de la aviación militar, trabajando fundamentalmente con carbono/epoxi y aramida/epoxi, empleando además métodos de fabricación de altas prestaciones como son el preimpregnado y el curado en autoclave.

Hoy en día han aparecido nuevos materiales y tecnologías de fabricación que han permitido la expansión de los materiales compuestos en multitud de industrias. Algunos ejemplos son las fibras de carbono de bajo coste, que han provocado que su consumo se haya disparado en un gran número de sectores, la aparición de nuevos procesos como el de moldeo por transferencia de resina (RTM), en uso tanto aeronáutico como no aeronáutico, o la aparición de preimpregnados de bajo coste con sistemas de curado alternativos en autoclave.

## 2.2 Tipologías

Como se ha comentado anteriormente, un material compuesto está formado principalmente de dos elementos, una matriz y un refuerzo. En función de los materiales utilizados en la matriz y el refuerzo se conseguirán unas propiedades u otras. Por esta razón es muy importante conocer los tipos de materiales y sus características para así obtener las propiedades mecánicas requeridas.

Atendiendo a esto podemos realizar diversas clasificaciones en función del tipo de matriz y de refuerzo.

### 2.2.1 Matrices

La matriz es el elemento continuo encargado de transmitir los esfuerzos por cortadura entre los elementos de refuerzo y de proteger las fibras contra agentes externos que pudieran dañarlas o desgastarlas.

A continuación, se muestra una clasificación de los distintos tipos de matrices empleadas en materiales compuestos:

#### 1. Poliméricas

Un polímero es una macromolécula sintética formada por la unión en cadena de monómeros.

Dentro de las matrices poliméricas encontramos dos grandes grupos, los termoplásticos y los termoestables.

### A. Termoestables

Los termoestables son polímeros caracterizados por tener fuerzas de unión de gran intensidad entre sus macromoléculas. Esto implica que al aumentar la temperatura no se producirá un cambio de estado de sólido a líquido, ya que difícilmente se romperán los enlaces.

En función de la temperatura de utilización podemos clasificar las resinas termoestables.

Bajas Temperaturas	Poliéster
Medias Temperaturas	Viniléster Epoxi
Medias-Altas Temperaturas	Fenólica
Altas Temperaturas	Bismaleimida Poiimida Ester cianato Pieteramida

**Tabla 2.** *Clasificación de las resinas termoestables en función de la temperatura de utilización*

Estas matrices son las más utilizadas en el ámbito industrial debido a las buenas propiedades de resistencia a las altas temperaturas, aunque poseen el inconveniente de que no pueden reutilizarse.

### B. Termoplásticas

Las resinas termoplásticas son macromoléculas sintéticas formadas por la unión en cadena de moléculas más pequeñas llamadas monómeros. Los enlaces de estas moléculas se caracterizan por ser de baja intensidad, lo que provoca que al aumentar la temperatura los enlaces se rompan y se produzca el cambio de estado de sólido a líquido, dando lugar a plástico fundido. Por esta razón son deformables con la temperatura y le confiere la capacidad de ser reciclables, al solidificarse por la disminución de la temperatura.

Los termoplásticos más comunes se muestran en la Tabla 3.

Termoplásticos	Nylon
	Policarbonato
	Poliacetato
	Poliamida
	Imida
	Poliéster
	Polisulfanato

**Tabla 3.** *Termoplásticos más comunes*

## 2. Cerámicas

Existen algunas matrices empleadas en determinados materiales compuestos formadas a base de materiales cerámicos. Estas matrices ofrecen una gran resistencia a esfuerzos mecánicos de compresión y a altas temperaturas. Sin embargo, su tenacidad es muy baja.

Las matrices cerámicas más comunes son de Alúmina y Carburo de Silicio.

## 3. Metálicas

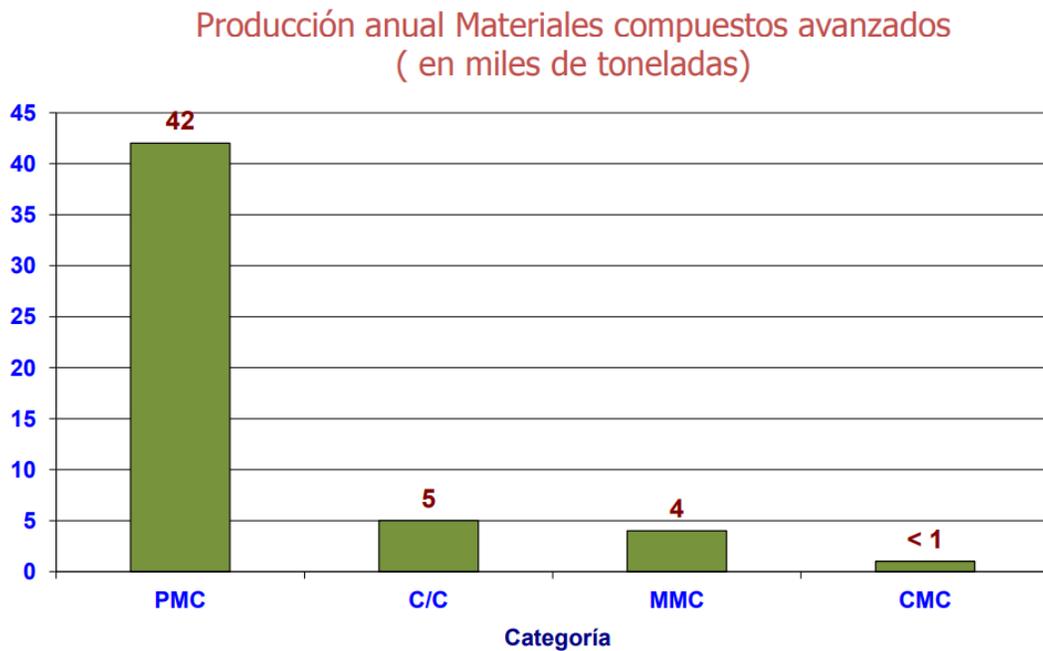
Las matrices metálicas se caracterizan por ofrecer una gran capacidad de resistencia al material compuesto. También ofrecen una gran rigidez y tenacidad a la fractura.

Las matrices metálicas más comunes son de aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio y aleaciones de cobre. (Rodríguez Galbarro, 2015)

A pesar de existir una gran cantidad de matrices, las más utilizadas a la hora de fabricar materiales compuestos son las poliméricas, concretamente las resinas termoestables. En la Gráfica 1, se observa la producción de materiales compuestos fabricados al año en función del tipo de matriz utilizada.

Para nuestro objeto de estudio y siguiendo las tendencias en cuanto al uso de matrices en la fabricación de materiales compuestos a nivel mundial, vamos a emplear una matriz termoestable, más concretamente una resina epoxi.

La elección de este tipo de matriz se debe a las características que poseen descritas anteriormente, destacando la gran resistencia mecánica que ofrecen debido a sus intensas fuerzas de unión entre sus moléculas. Esta propiedad al combinarla con las propiedades de las fibras de refuerzo nos permitirá obtener un material con una gran resistencia mecánica teóricamente.



**Gráfica 1.** Producción anual de materiales compuestos.

*Fuente Apuntes Carlos III*

- Resina Epoxi

Las resinas epoxi entran en el grupo de matrices más utilizada en la fabricación de materiales compuestos, junto a las resinas de poliéster y éster vinílico. Esto se debe a las propiedades mecánicas que ofrecen en combinación con el material de refuerzo. En la Tabla 4 se pueden observar las propiedades que ofrecen este tipo de resinas.

	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)	Elongación (%)	Temperatura de uso (°C)
Epoxi	1,1-1,3	2,8-4,2	55-130	2,0-3,2	60-200
Poliéster	1,1-1,4	1,6-4,1	35-103	1,0-5,0	60-130
Éster Vinílico	1,1-1,3	3,5	73-81	3,5-5,5	60-103

**Tabla 4.** *Propiedades de matrices poliméricas más utilizadas*

Las resinas epoxi son polímeros que contienen grupos epóxidos, los cuales pueden reaccionar consigo mismos o a través de endurecedores o agentes de curado como aminas polifuncionales, ácidos, anhídridos ácidos, fenoles, alcoholes y tioles. La reacción de estos grupos epóxidos consigo mismos o con los endurecedores dan lugar a polímeros termoestables. (May & Schalack, 2018)

El tipo de epóxido y del agente de curado, determina las propiedades de las resinas.

Las resinas epoxi más utilizadas están basadas en dos estructuras químicas: TGMDA (dianilina tetraglicidil metileno) y DGEBA (diglicidil eter de bisfenol A). La diferencia principal entre estos dos tipos de moléculas es que las TGMDA curan a una densidad de entrecruzamiento mayor que las Bisfenol A. Esto da lugar a que tengan altos valores del módulo de Young, pero bajos valores de deformación de rotura. La epoxi basada en Bisfenol A es la más utilizada actualmente.

En la Tabla 5, se muestran las propiedades de las resinas epoxi más utilizadas.

	TGMDA	Bisfenol A
Módulo de Young (MPa)	3800-4500	2750-3450
Deformación de rotura (%)	1-2	5-8
T (°C)	175-235	120-175
Absorción de agua (%)	4-6	2-3

**Tabla 5.** *Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas*

## 2.2.2 Refuerzos

Los refuerzos son los elementos del material compuesto que le confieren sus propiedades mecánicas. Se encargan de absorber las tensiones e incrementar la rigidez y la resistencia del conjunto. (Rodríguez Galbarro, 2015)

En general existen dos tipos de refuerzos:

- Refuerzos discontinuos: Dentro de este tipo de refuerzos podemos distinguir entre partículas, plaquetas o fibras cortas.
- Refuerzos continuos: se trata de refuerzos formados por fibras largas. Dentro de ellos encontramos refuerzos a base de fibras largas, tejidos o laminados.

### 2.2.2.1 Refuerzos discontinuos

Los refuerzos discontinuos se utilizan normalmente como refuerzo de materiales en los que no se necesitan altas prestaciones desde el punto de vista mecánico. Dentro de los refuerzos discontinuos podemos diferenciar según su forma entre las partículas, plaquetas y fibras cortas. Las dos primeras se caracterizan por tener todas sus dimensiones iguales, mientras que las fibras cortas poseen una longitud mayor que su sección transversal.

A continuación, se muestran las características principales de cada refuerzo:

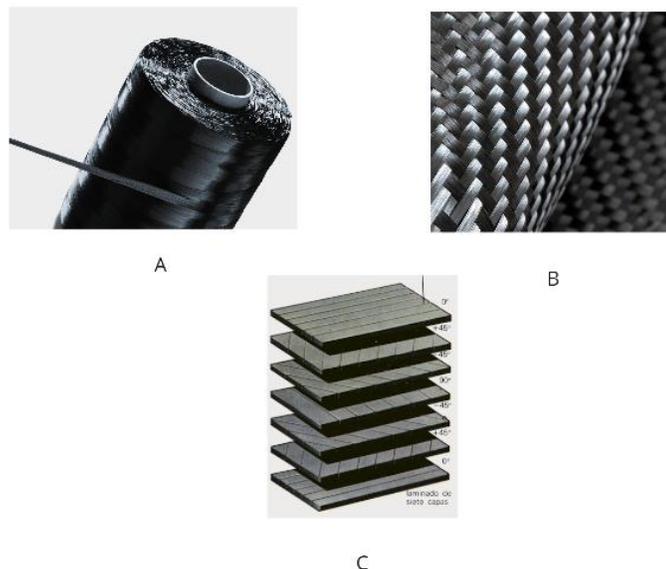
- Partículas: el uso de partículas como refuerzo en materiales compuestos provoca un aumento modesto de sus propiedades. Sin embargo, adquieren un comportamiento isótropo y son los materiales menos costosos y con menor dificultad de fabricación.
- Plaquetas: este tipo de refuerzo tampoco le confiere al material un gran aumento de las propiedades mecánicas, aunque si alcanza mayores grados de compactación con respecto a los refuerzos por partículas.
- Fibras cortas: la capacidad de refuerzo de este tipo de elementos va a depender de las longitudes de las fibras y de su orientación. Este tipo de refuerzos tienen como característica que ofrecen excelentes propiedades mecánicas en la dirección de las fibras.

### 2.2.2.2 Refuerzos continuos

Los materiales compuestos fabricados con refuerzos continuos normalmente son empleados en aplicaciones en las cuales los requerimientos mecánicos son elevados. Así, dentro de estos refuerzos encontramos distintos tipos como las fibras continuas o fibra larga, en las que la longitud es mucho mayor que su sección transversal; refuerzos en forma de tejidos o refuerzos laminados.

A continuación, se explican las características principales de cada uno de estos refuerzos:

- Fibras continuas: se trata de fibras largas en forma de hilo en las que  $L/D > 100$ , siendo L la longitud de la fibra y D su diámetro.
- Tejidos: son un tipo de refuerzo que en el que varios hilos se encuentran entrelazados entre sí alternando las direcciones.
- Laminados: se trata de refuerzos formados por el apilamiento finito de capas de bajo espesor llamadas láminas, con diferentes orientaciones. Son los más empleados debido al buen comportamiento mecánico.



**Figura 3.** (A) Fibras continuas (B) Tejido (C) Laminado

### 2.2.2.3 Tipos de fibras

Hoy en día el uso de fibras como refuerzo en materiales compuestos se ha convertido en lo más común. Debido a esta popularidad, se sigue investigando sobre que materiales son apropiados para desarrollar este tipo de función.

Las principales fibras empleadas como refuerzo en materiales técnicos son las siguientes:

- Fibras de vidrio: La fibra de vidrio es el refuerzo más empleado en la fabricación de materiales compuestos. Esto se debe a su bajo coste, buena resistencia a la corrosión, acuta bien como aislante eléctrico, posee un bajo coeficiente de dilatación, tiene una alta adherencia fibra-matriz y posee una buena resistencia desde el punto de vista mecánico.

Históricamente, es de los materiales más antiguos que se conocen en el mundo de los materiales compuesto, habiéndose encontrado restos de este tipo de refuerzo en el antiguo Egipto. Además, los primeros tejidos a base de fibra de vidrio datan del siglo XVIII, siendo empleados en la fabricación industrial a partir a 1938.

Dentro de los refuerzos de fibra de vidrio encontramos varios tipos en función del tipo de vidrio utilizado:

- Vidrio E: Son las más utilizadas ya que poseen una buena relación entre las propiedades que ofrecen y un coste moderado. Son empleadas principalmente como aislante eléctrico.
- Vidrio R o S: Se trata de fibras con mejores propiedades mecánicas. Poseen una alta resistencia y rigidez. Son empleadas en componentes estructurales de todo tipo. Muy usadas en la aeronáutica y en defensa.
- Vidrio D: Fibras que poseen altas propiedades dieléctricas. Se emplean en aplicaciones donde se requiera permeabilidad de ondas electromagnéticas.
- Vidrio A: Son fibras que tienen menos resistencia y rigidez que el Vidrio E, pero poseen mejor resistencia a la corrosión por compuestos químicos.

Las propiedades mecánicas de los distintos tipos de fibra se muestran en la Tabla 6.

Propiedad	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2500	2580	2480	2590
Resistencia a la tracción (GPa)	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
Módulo de Young (GPa)	69	73	86	85

**Tabla 6.** *Propiedades de la fibra de vidrio*

- Fibras de carbono: Las fibras de carbono se caracterizan por ser las fibras con mejores propiedades mecánicas en relación con su baja densidad. Son además junto con las fibras de vidrio las más empleadas en las industrias.

Se caracteriza por tener altas propiedades mecánicas, en función del proceso de fabricación puede considerarse un material anisótropo, posee una baja resistencia al impacto, son materiales con gran estabilidad dimensional debido al muy bajo coeficiente de dilatación que poseen, tienen una buena conductividad térmica y poseen buena resistencia a la fatiga.

Estas fibras fueron utilizadas por primera vez para la fabricación de filamentos para las bombillas en el siglo XIX. Su empleo en la fabricación industrial data de los años sesenta en la industria aeronáutica.

Las fibras de carbono son un material de gran aplicación debido a su gran resistencia mecánica, similar a la del acero, acompañada de un muy bajo peso como el del plástico. Esto se debe a su alto módulo de elasticidad entre otras cosas.

Podemos distinguir distintos tipos de fibras de carbono en función de su modulo:

- Alto módulo (HM)
- Alta resistencia (HR)

En la Tabla 7, que se muestra a continuación pueden observarse las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de fibras de carbono.

Propiedad	HR	HM
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1740-1760	1810-1870
Resistencia a la tracción (GPa)	2,6-5	2,1-2,7
Módulo de Young (Gpa)	230	390
Coefficiente de Poisson	0,3	0,35

**Tabla 7.** *Propiedades de la fibra de carbono*

- Fibras de aramida: La fibra de aramida es una fibra orgánica sintética fabricada a partir de un polímero. Dentro de este tipo de fibras la más utilizada es el kevlar.

El kevlar es una poliamida descubierta en 1965 por la compañía Dupont. Se caracteriza por ser fibras con una alta resistencia y soportar muy bien la corrosión además de tener una baja densidad. Tienen un coeficiente de dilatación nulo y unas propiedades de resistencia frente al impacto excelentes.

Sus principales usos son en el refuerzo de ropa de altas prestaciones, chalecos y cascos antibalas.

Existen diversos tipos de fibras de kevlar en función de su resistencia:

- De bajo módulo
- De alto módulo

A continuación, se muestra en la Tabla 8, se muestran las propiedades de estas fibras.

Propiedad	Kevlar 29	Kevlar 49
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1440	1450
Resistencia a la tracción (GPa)	1,92	2,94-3,6
Módulo de Young (GPa)	60	130

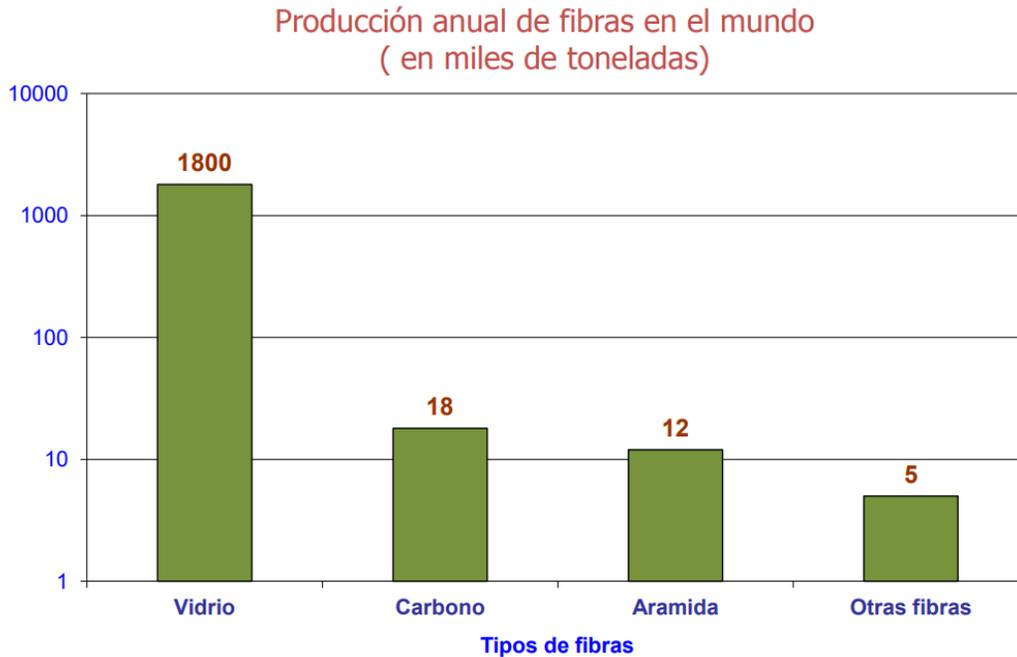
**Tabla 8.** *Propiedades de las fibras de kevlar*

- Fibras de boro: Son fibras orgánicas al igual que las fibras de kevlar. Se caracteriza por ser un material duro y con una temperatura de fusión elevada. Poseen buena resistencia a compresión y una alta rigidez. Sin embargo, tienen un alto coste por lo que es utilizada para aplicaciones muy específicas.
- Fibras metálicas: Existen diversos tipos de fibras metálicas en función del material, de aluminio, acero y titanio. Se caracterizan por tener una buena resistencia. Sin embargo, tienen una densidad mayor que el resto de las fibras y además, un alto coste de fabricación.

Para la realización de nuestro proyecto de investigación hemos decidido emplear fibras cortas de carbono. Las fibras utilizadas se obtienen de retales que provienen de la fabricación de tejidos de fibra de carbono. Estos restos de fibras que quedan sin utilizar se cortan en fibras cortas a una longitud específica. En el mercado existen varios tipos que oscilan desde los 4 mm hasta los 20 mm de longitud. Además, en función del número de fibras que conforman el hilo podemos encontrar distintos tipos: 3K, 6K y 12K.

En nuestro caso utilizaremos fibras con una longitud de 12 mm y de categoría 3K.

En la Gráfica 2 se muestra la producción anual de fibras para la fabricación de materiales compuestos a nivel mundial.

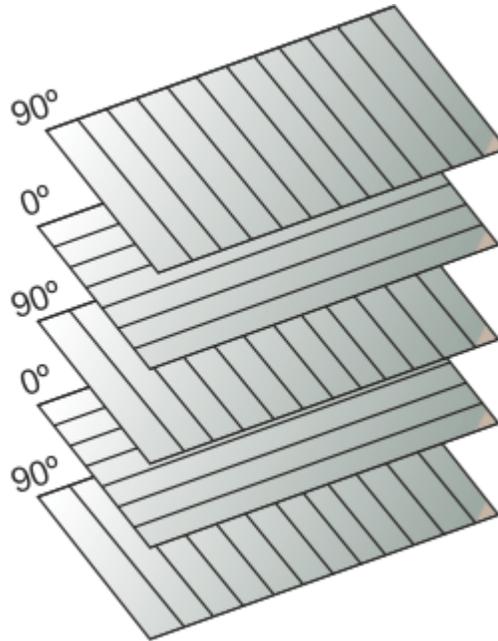


**Gráfica 2.** *Producción anual de fibras (2010)*

#### 2.2.2.4 Factores que influyen en el refuerzo

Hemos visto anteriormente que las propiedades de las fibras influyen directamente en el comportamiento de un material compuesto. Sin embargo, existen otros factores muy importantes relacionados con las fibras que también modificarán las propiedades finales del material.

- **Orientación de las fibras:** La orientación de las fibras es un factor fundamental en el uso de fibras continuas. El valor de resistencia máxima de una fibra se obtiene cuando la carga está aplicada de manera paralela a ella misma. Debido a esto, a la hora de diseñar componentes utilizando materiales compuestos con fibras, se deberá tener en cuenta donde se encuentran situadas las cargas para así conseguir una correcta orientación de las fibras. En la Figura 4, se muestra un esquema de como se realiza un laminado.
- **Fracción volumétrica:** la fracción volumétrica es la relación entre el refuerzo y la matriz. A mayor volumen de fibras mayor será la resistencia del material.



**Figura 4.** *Esquema de un laminado*

## 2.3 Métodos de fabricación

A la hora de fabricar materiales compuestos encontramos una gran variedad de métodos. En función de las características del material, será más adecuado utilizar unos métodos u otros.

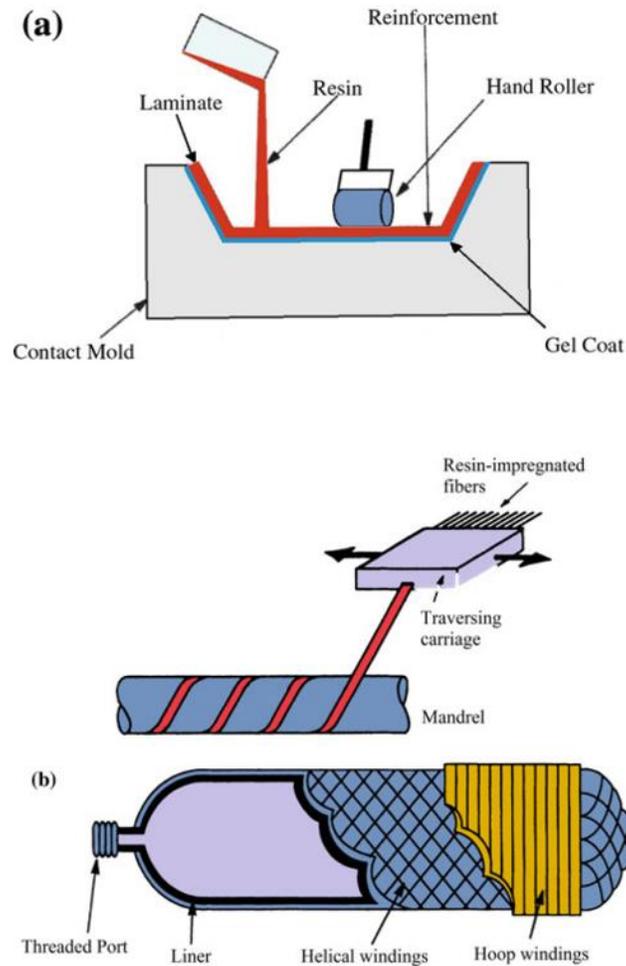
Podemos diferenciar dos grandes grupos, los métodos de fabricación en molde abierto y en molde cerrado. Dentro de estos dos grupos, encontramos una gran variedad de métodos de fabricación.

### 2.3.1 Procesos de molde abierto

Los procesos en molde abierto son los utilizados desde hace más tiempo. Se trata de métodos clásicos y normalmente de coste reducido. (Krishan K, 2012)

Son utilizados para multitud de aplicaciones como embarcaciones, piezas de vehículos, etc.

- Laminado manual: Es el proceso de fabricación más simple. Las fibras son colocadas en un molde previamente preimpregnado con un desmoldante. En función del tipo de fibra que se esté utilizando, se empleara más o menos resina. Para ayudar a distribuir de manera correcta la resina y asegurar de que todas las fibras queden cubiertas, se utiliza un rodillo de compactación. (Figura 5)
- Filament winding: se trata de una técnica que consiste en ir enrollando alrededor de un molde cilíndrico fibras continuas previamente impregnadas de resina. El enrollamiento consta de miles de filamentos individuales que se van enrollando, formando un patrón determinado. (Figura 5). Es un proceso especialmente indicado para la fabricación de piezas huecas como tanques o tuberías. (Bird, 2021)



**Figura 5.** a) *Proceso de fabricación Laminado a mano.* b) *Proceso de fabricación Filament Winding*

- Autoclave: Es un proceso en el que el curado de los componentes se realiza en el interior de una cabina.

El autoclave es una cabina en forma cilíndrica, cuyo interior tiene una atmósfera controlada, en presión y temperatura. La función es curar y consolidar los materiales compuestos acorde a los requerimientos de sus componentes. En función del tamaño del autoclave se podrán fabricar piezas de mayor o menor tamaño. En la Figura 6 se muestra un autoclave empleado para la fabricación de las alas de un Boeing 787.



Figura 6. Autoclave utilizado en la industria aeronáutica

### 2.3.2 Procesos de molde cerrado

Los procesos con molde cerrado nos permiten obtener componentes de mayor calidad y de forma más rápida. Las piezas tienen mejor acabado estético y el desperdicio de material es menor. Son procesos que se requiere una menor cualificación en la mano de obra ya que normalmente están automatizados. De esta manera el volumen de producción normalmente es mayor y los costes de producción menores. (Escudero López, 2001)

Al igual que en los procesos de molde abierto, existen diferentes técnicas a la hora de emplear estos métodos de fabricación:

- Pultrusión: se trata de un proceso continuo en molde cerrado. Las fibras impregnadas de resina pasan a través de un molde a alta temperatura. Gracias al calor, se consigue la curación del compuesto con la forma del molde.

Es un proceso altamente automatizado, similar a un proceso de extrusión. Sin embargo, en este caso se tira del material. En la Figura 7, se puede observar un esquema del proceso.

Es un proceso muy utilizado para la fabricación de perfiles de largas longitudes los cuales se cortarán posteriormente a la medida necesaria.

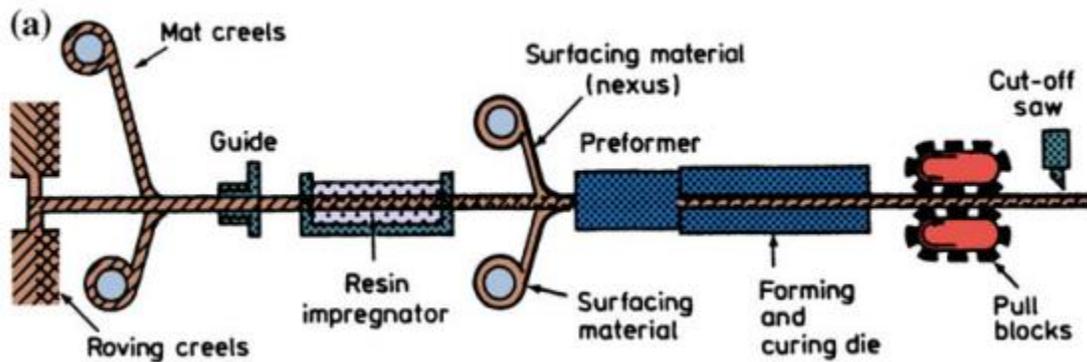


Figura 7. Proceso de fabricación Pultrusión

- Sheet molding compound (SMC): el SMC es un proceso de moldeo por compresión en caliente. El molde se encuentra a una temperatura que puede oscilar entre 130-170 °C, con el fin de facilitar el curado de la resina en un tiempo de 30 a 150 segundos, dependiendo del material. Una vez curada la pieza, se abre el molde y se desmoldea la pieza.

El material llamado preimpregnado o prepeg, es una lámina formada por fibras que llevan la resina preimpregnada, pero en un estado semicurado. A este laminado se le pueden añadir algunos aditivos con el fin de mejorar las propiedades finales de la pieza. En la Figura 8, se puede observar el proceso de conformado de estos materiales:

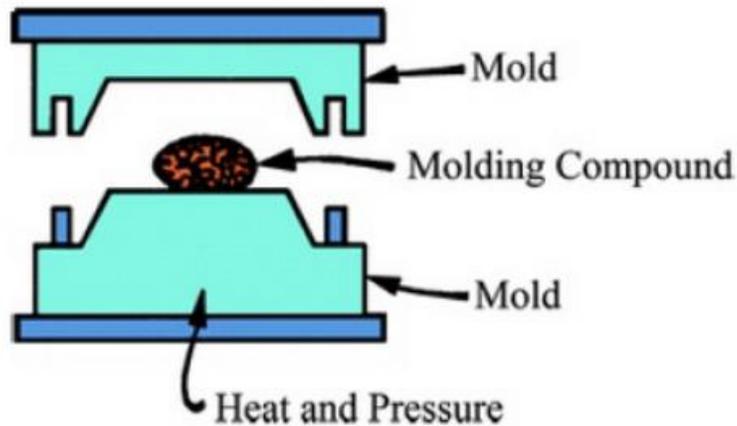


Figura 8. *Proceso de fabricación SMC*

- Infusión con bolsa de vacío: es una técnica de molde cerrado semirrígido en la que el contramolde es simplemente una capa de film plástico. A través de unos conductos colocados en el film, se hace el vacío del molde consiguiendo una compactación de las fibras de refuerzo y una distribución de la resina a través de todas las capas. Además, el excedente de resina es expulsado a través de los tubos.

Previamente hay que realizar el laminado mediante el proceso de laminación a mano visto anteriormente.

Se utiliza para la fabricación de grandes piezas, ya que el proceso de fabricación y los moldes no son relativamente caros. Si se requiere de una mano de obra cualificada.

- Resin Transfer Moulding (RTM) o Moldeo por transferencia de resina. Se trata de un proceso de molde cerrado en el que molde y contramolde son rígidos, con el fin de poder inyectar resina a una gran presión. El proceso consiste en colocar las fibras de refuerzo en seco sobre la superficie del molde. Una vez colocadas se cierra el contramolde, asegurando estanqueidad a través de unas juntas. Con el molde cerrado y ayuda de una bomba de vacío se comienza a inyectar la resina a través de unos conductos destinados para ello. Una vez curada la resina se procede a eliminar el vacío y a abrir el molde.

Es un proceso que proporciona buenos acabados superficiales.

## 2.4 Ensayos

Para determinar las propiedades mecánicas de los materiales es necesario caracterizarlos experimentalmente mediante ensayos mecánicos, que podrán ser destructivos y no destructivos. Nosotros nos centraremos en los ensayos destructivos.

Los ensayos destructivos permiten llevar al límite el material con el fin de conocer las propiedades mecánicas del mismo. Existen multitud de ensayos para caracterizar materiales; sin embargo, en el mundo de los materiales compuestos los más utilizados son los siguientes:

- Ensayo de tracción
- Ensayo de compresión
- Ensayo de flexión en tres puntos
- Ensayo de impacto
- Ensayo de fatiga
- Ensayo de compresión después de impacto

Para la caracterización de nuestro material emplearemos el ensayo de tracción y el ensayo de impacto.

### 2.4.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción uniaxial constituye el método fundamental para determinar las especificaciones de un material. En este ensayo se somete una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción hasta que se produce la rotura.

La norma utilizada por excelencia dentro del mundo de los materiales compuestos es la *ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites Materials*. Esta norma rige el procedimiento de cómo llevar a cabo el ensayo de tracción universal en materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras ya sean continuas o discontinuas. Este ensayo arroja los datos de fuerza y desplazamiento hasta la rotura de la probeta.

A través de estos datos se puede obtener el módulo de elasticidad, la resistencia y el alargamiento a rotura:

- Resistencia a tracción ingenieril: se calcula a partir de la carga de tracción aplicada sobre la probeta dividida entre la sección transversal.

$$\sigma = F/A_0$$

- Módulo de elasticidad o módulo de Young: es un parámetro que indica la relación existente entre los incrementos de tensión y la deformación longitudinal unitaria del material. Sirve para conocer la rigidez del material, a mayor modulo elástico, mayor rigidez.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

- Deformación unitaria: se define como el cociente entre la deformación de la probeta en la dirección a la carga aplicada y su dimensión inicial.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

#### 2.4.2 Ensayo de impacto de baja velocidad

El ensayo de impacto de baja velocidad es un ensayo que ha ganado importancia en el ámbito de los materiales compuestos debido a la sensibilidad que presentan estos material frente a impactos localizados, como puede ser la caída de una herramienta durante tareas de mantenimiento. El ensayo consiste en la aplicación de una fuerza impulsiva de contacto que actúa en un área pequeña del material durante un corto periodo de tiempo. (Miravete & Castejón, 2007)

Existen varios tipos de máquinas para realizar este tipo de ensayos. Fundamentalmente se utilizan dos: la máquina de impacto por caída vertical de un peso (Figura 9) y la máquina de impacto pendular (Figura 10).

La información más útil que nos pueden ofrecer este tipo de máquinas es la energía absorbida en el impacto por el material y con ello determinar la tenacidad del material.

Para nuestro proyecto, emplearemos una máquina de impacto pendular, diseñada en la propia Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Béjar.

El ensayo consiste en dejar caer un impactador colocado en el extremo de un péndulo, sobre una probeta. Una vez partida la probeta y conociendo la posición angular final del péndulo, podremos determinar la energía que se ha empleado para romper la probeta.

El fundamento teórico en que se basa este ensayo es el principio de conservación de la energía. Conociendo la posición angular final máxima de la máquina en vacío, se puede calcular mediante la utilización de balances de energía, la energía empleada en romper la probeta y por lo tanto la tenacidad de fractura.

$$E_{abs} = E_i - E_f - \text{Pérdidas}$$

Donde

$E_{abs}$  → Energía absorbida en la rotura de la probeta, expresada en julios.

$E_i$  → Energía inicial, en julios

$E_f$  → Energía final, en julios.

$$a_{cu} = \frac{E_{abs}}{h \cdot b} \left( \frac{J}{m^2} \right)$$

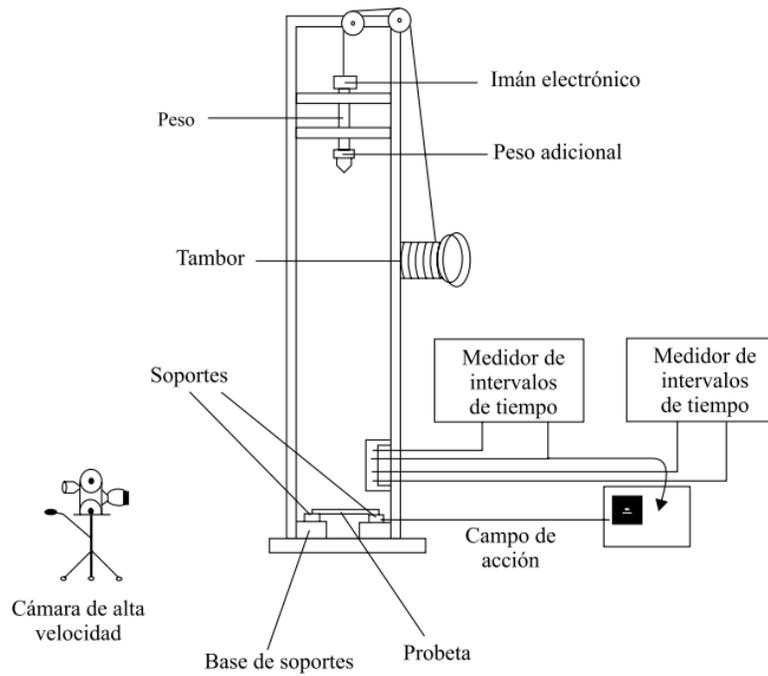
Donde

$a_{cu}$  → Tenacidad de fractura.

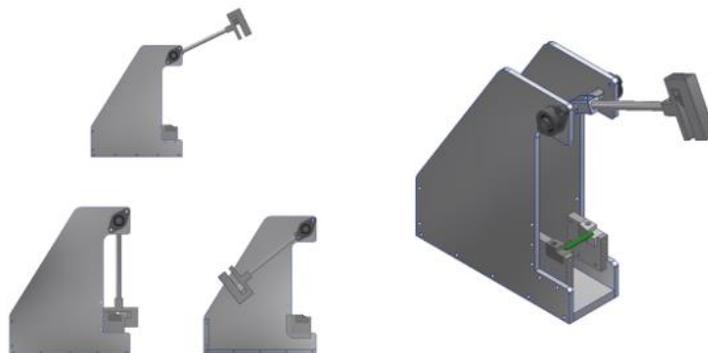
$E_{abs}$  → Energía absorbida en la rotura de la probeta, expresada en julios.

$h$  → Espesor de la probeta, expresado en metros.

$b$  → Anchura de la probeta, expresada en metros.



**Figura 9.** *Máquina de impacto por caída vertical*



**Figura 10.** *Máquina de impacto pendular Charpy diseñada en la propia ETS de Ingeniería Industrial de Béjar.*

### 3 MATERIALES Y MÉTODO DE FABRICACIÓN

En este capítulo se presenta el proceso de fabricación mediante el que se han elaborado las probetas de fibra de carbono y de aluminio.

#### 3.1 Materiales

Las probetas de material compuesto se han fabricado a partir de una resina termoestable de tipo epoxi, reforzada con fibras de carbono cortas y distribuidas aleatoriamente. La longitud de las fibras es de 12 mm, y el número de filamentos de 3000 unidades. Las probetas se han fabricado mediante un proceso de compresión en molde y curado a temperatura ambiente, tal y como se describirá en el siguiente apartado.

Las probetas de aluminio se han cortado a partir de unas pletinas empleadas para la colocación de ventanas.

##### 3.1.1 Fibra de carbono

- Refuerzo

La fibra de carbono empleada como elemento de refuerzo para la fabricación de las probetas es una fibra de calidad 3K. Al tratarse de refuerzo por fibras cortas, las fibras están cortadas a una longitud de 12 mm. En la Tabla 9 se muestran las características técnicas de la fibra:

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Fibra de Carbono 3K	Unidades
Longitud	12	mm
Densidad	1,8	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	235	GPa
Resistencia a la tracción	4,41	GPa
Deformación	1,5	%

**Tabla 9.** *Características técnicas fibra empleada*

- Matriz

La matriz elegida para la fabricación del material compuesto es una resina epoxi. Tiene buenas propiedades mecánicas y un tiempo de manipulación y de curado adecuado para el tipo de fabricación empleado. En la Tabla 10 se muestra las características técnicas de la resina:

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Resina Epoxi	Unidades
Densidad	1,1	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	3,35	GPa
Resistencia a la tracción	69,5	MPa
Deformación	7	%
Tiempo de manipulación	30	m
Tiempo de curado	24	h
Temperatura	25	°C

**Tabla 10.** *Características técnicas resina Epoxi*

### 3.1.2 Aluminio

Las probetas se han obtenido de una chapa de aluminio AW 5005 de 1,5 mm de espesor empleado en la fabricación de carpintería metálica. Esta aleación de aluminio se caracteriza por tener un alto contenido en magnesio. Posee unas características mecánicas medias, muy buena soldabilidad y excelente resistencia a la corrosión. Las propiedades se muestran en la Tabla 11.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Aluminio AW-5005	Unidades
Densidad	2,7	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	69,5	GPa
Resistencia tracción	145	MPa
Temperatura de fusión	630-655	°C
Coeficiente de dilatación lineal	23,5	μm/mK

**Tabla 11.** *Características técnicas Aluminio AW 5005*

### 3.2 Fabricación de las probetas de fibra de carbono

En primer lugar, debemos conocer las dimensiones de las probetas, para posteriormente diseñar los moldes.

Como se comenta anteriormente, seguiremos las reglas que dicta la norma ASTM D3039. En la Tabla 12, extraída de la norma se especifican las dimensiones que deben tener las probetas.

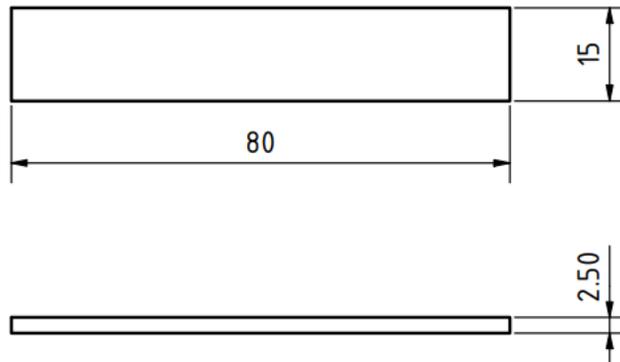
**TABLE 1 Tensile Specimen Geometry Requirements**

Parameter	Requirement
<b>Coupon Requirements:</b>	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed <sup>A</sup>
specimen width tolerance	± 1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	± 4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
<b>Tab Requirements (if used):</b>	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	± 1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

<sup>A</sup> See 8.2.2 or Table 2 for recommendations.

**Tabla 12.** *Dimensiones de las probetas en ensayo de tracción (ASTM D3039)*

Teniendo en cuenta estos requerimientos y con el fin de disminuir los costes del proyecto, las probetas a ensayar tendrán las dimensiones mostradas en la Figura 11.



**Figura 11.** *Dimensiones probeta*

Para la fabricación de las probetas se llevará cabo un método de fabricación similar al Sheet Moulding Compound en frío. Este método consta de un molde de tres piezas en el que se introduce el material de refuerzo a la vez que se impregna de resina. Una vez colocada la mezcla en el interior del molde, se cierra, se comprime y se deja curar 24 horas.

### 3.2.1 Diseño del molde

El diseño de los moldes es un proceso clave en la fabricación de piezas de material compuesto. La calidad y las propiedades de los componentes están directamente relacionados con la geometría y calidades del molde. Por ello merece especial atención dedicar tiempo a este apartado.

La fabricación de los moldes se llevó a cabo mediante fabricación aditiva. Se trata de un método de fabricación a través del cual el material es depositado en finas capas de manera controlada. Su gran versatilidad a la hora de crear casi cualquier tipo de geometría y su bajo coste han hecho de este método uno de los más utilizados en la última década.

El material que utilizaremos para la fabricación es PLA (Poliácido láctico). Es uno de los polímeros termoplásticos más utilizados por su facilidad de uso en la impresión. Además, cuenta con unas propiedades mecánicas aceptables para los requerimientos de nuestro proyecto.

El diseño de los moldes se ha realizado mediante el software de diseño CAD Inventor. A través de las herramientas de boceto y extrusiones se realizan las geometrías y volúmenes de las piezas. Para obtener la geometría deseada de la pieza, ha sido necesario probar distintos diseños del molde. A continuación, se muestran los distintos moldes diseñados hasta la obtención del molde definitivo.

#### 3.2.1.1 Diseño preliminar

El primer diseño del molde consta de cuatro piezas, dos de ellas unidas mediante varillas roscadas y las dos restantes funcionan como sistema de compresión. La razón por la cual se compone de cuatro piezas es para facilitar el desmoldeo de las probetas. En la Figura 12 y Figura 13 se muestra una vista del diseño con todos los componentes y una imagen una vez impreso en 3D.

A la hora de fabricar las probetas con este molde no se obtuvieron unos resultados satisfactorios. A pesar de diseñar el molde intermedio en dos partes con los agujeros para las varillas roscadas, el desmoldeo era complicado por lo que decidimos optar por otro molde.

#### 3.2.1.2 Diseño final

Dado que el diseño preliminar no arrojó los resultados previstos, procedimos a realizar otro nuevo diseño, simplificando las piezas y añadiendo nuevas partes con el fin de obtener probetas con buena calidad y repetibilidad.

Tal y como se indica en la Figura 14 y la Figura 15, en este segundo diseño el molde consta de tres piezas. Una pieza intermedia que posee la geometría de la probeta y otras dos piezas que funcionan como sistema de compresión. A estas dos piezas se les ha realizado un chaflán a lo

largo de todo el perímetro de uno de sus bordes. Esta operación se ha realizado con la finalidad de poder desmoldar mejor la pieza haciendo palanca al introducir un destornillador de tipo plano.

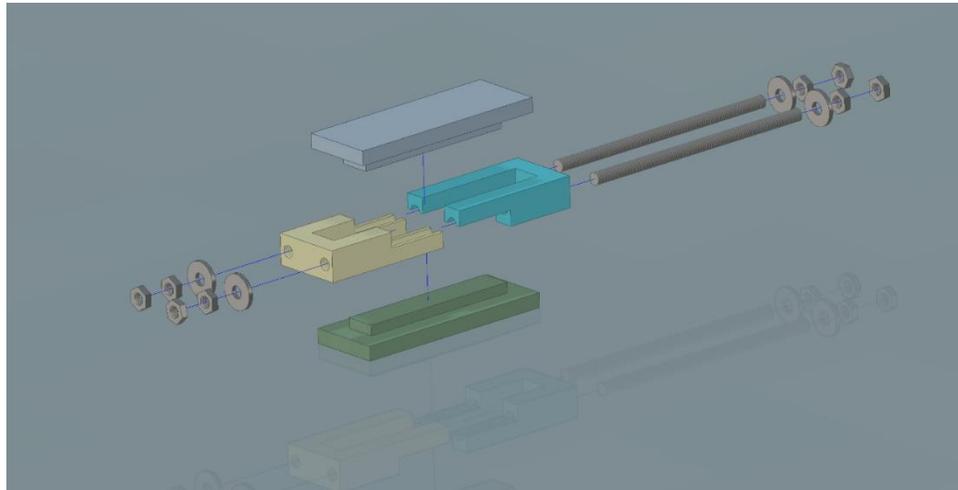


Figura 12. *Diseño molde 1*

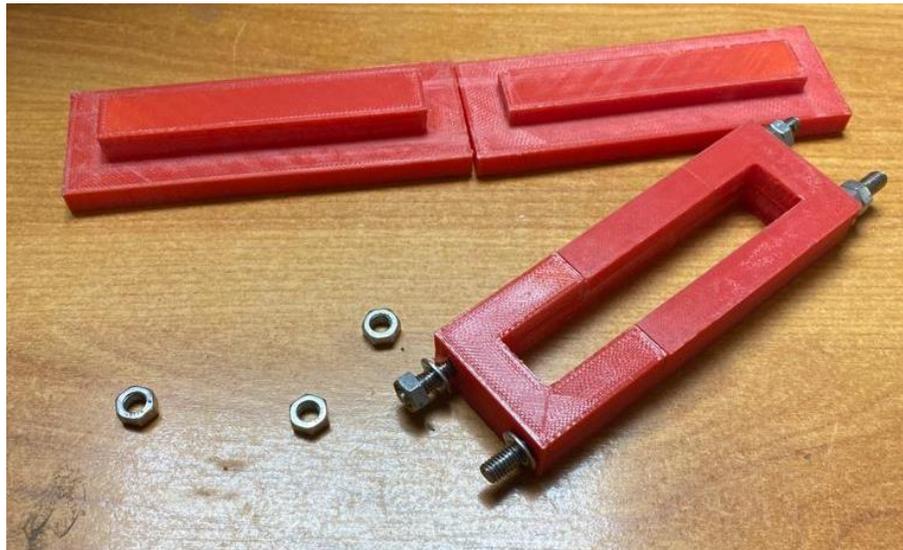


Figura 13. *Molde 1 fabricado*

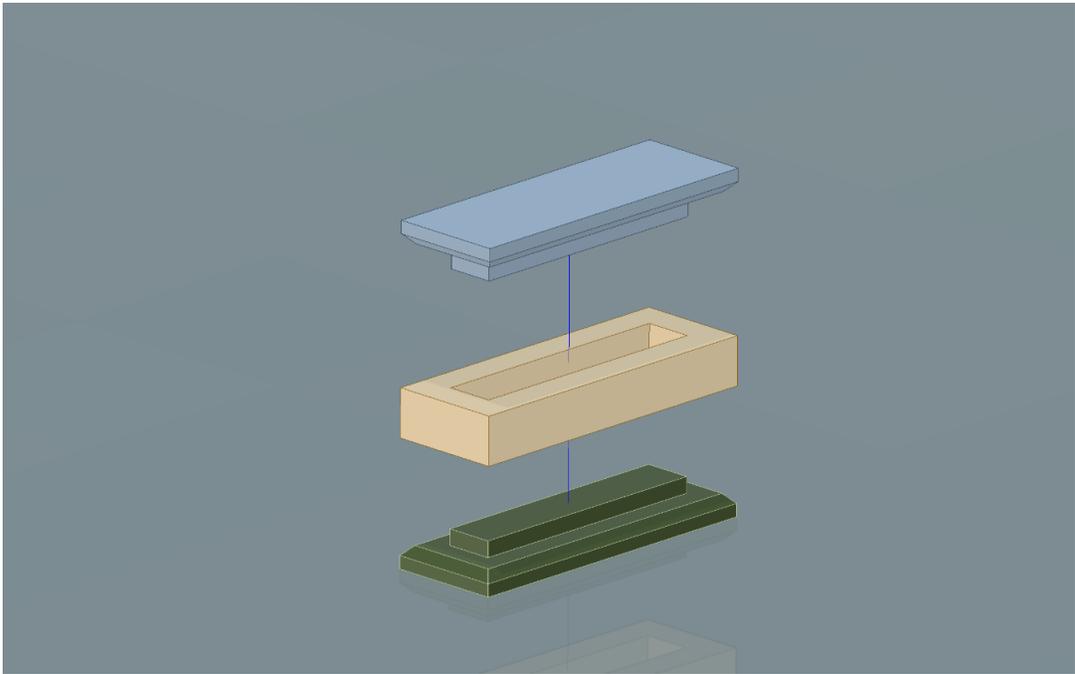


Figura 14. *Diseño final*

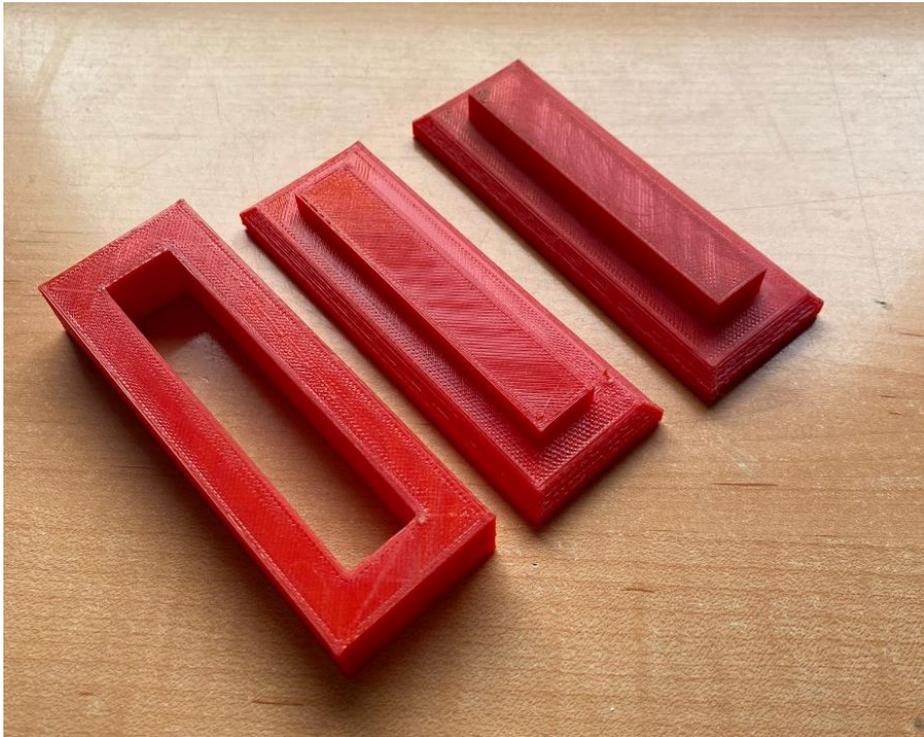


Figura 15. *Molde final fabricado*

### 3.2.2 Fracción volumétrica

La fracción volumétrica es la relación en volumen entre el material de refuerzo y el compuesto. En un material compuesto, cuanto mayor sea la adherencia entre refuerzo y matriz, mejores propiedades mecánicas tendrá.

En nuestro caso de estudio hemos decidido realizar dos tipos de probetas con distintas relaciones volumétricas con el objetivo de comparar la capacidad de refuerzo que proporciona la fibra a la resina.

Las cantidades de resina y fibra utilizadas en las probetas son las siguientes:

- Probetas Tipo 1: Fibra 60%, Resina 40%
- Probetas Tipo 2: Fibra 40%, Resina 60%

Conociendo el volumen total de la probeta y las densidades de los materiales calculamos el peso para la realización de la mezcla. A modo de ejemplo se muestran los cálculos para las probetas Tipo 1:

$$V_T = 3000 \text{ mm}^3$$

$$V_F = V_T \cdot \% \text{ de fibra}$$

$$V_F = 3000 \cdot 0,6 = 1800 \text{ mm}^3$$

$$V_M = V_T \cdot \% \text{ de matriz}$$

$$V_M = 3000 \cdot 0,4 = 1200 \text{ mm}^3$$

$$M_F = V_F \cdot \rho_F$$

$$M_F = 1,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1800 \cdot 10^3 = 3,24 \text{ g}$$

$$M_M = V_M \cdot \rho_M$$

$$M_M = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1110 \cdot 10^3 = 1,332 \text{ g}$$

Siendo

$V_T$  → Volumen total de la probeta

$V_F$  → Volumen de fibra

$V_M$  → Volumen de matriz

$M_F$  → Masa de fibra

$M_M$  → Masa de matriz

	Fibra (%)	Resina (%)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Masa de Fibra (g)	Masa de Resina (g)
Probeta tipo 1	60	40	80	15	2,5	3000	3,24	1,33
Probeta tipo 2	40	60	80	15	2,5	3000	2,16	1,99

**Tabla 13.** *Datos probetas*

### 3.2.3 Fabricación

En este apartado se describe detalladamente el proceso de fabricación de las probetas, desde la preparación de los moldes hasta las operaciones de acabado final de las probetas.

- Preparación de los moldes

El proceso de fabricación comienza con la fabricación de los moldes mediante impresión 3D. Las piezas impresas como se muestra en la Figura 15 tienen pequeñas imperfecciones, por lo que hay que realizar unas operaciones de acabado. Estas operaciones consisten en un lijado con papel de lija, empezando con granos gruesos, hasta finalizar con granos más finos progresivamente.

Una vez lijada la pieza, se coloca una capa de cinta de embalar en la superficie que va a estar en contacto con la resina epoxi (Figura 16), y posteriormente se le aplica una capa de parafina. De esta manera nos aseguramos de que vamos a poder realizar un desmoldeo de manera sencilla, sin necesidad de romper ningún molde.



**Figura 16.** *Molde acabado final*

- Pesaje de los compuestos

Para realizar correctamente las mezclas es necesario pesar con exactitud las proporciones de cada material. Por esta razón, para la realización del pesaje de los materiales utilizamos una balanza de precisión (Figura 17).



Figura 17. Balanza de precisión

El procedimiento de pesaje consiste en colocar en la balanza y poner a cero el recipiente donde vamos a añadir los materiales a pesar. Una vez puesta la balanza a cero, procederemos a añadir poco a poco el material que deseamos pesar, hasta conseguir la masa teórica calculada en la Tabla 13.



**Figura 18.** *Puesta a cero del recipiente en balanza*



**Figura 19.** *Pesaje de la fibra*

De la misma manera realizamos el pesaje de la resina con la proporción de catalizador necesaria (Figura 20). En nuestro caso debemos de añadir 27 partes de catalizador por cada 100 de resina. Además, añadiremos un 20% más de resina del teórico calculado en la Tabla 13 con el fin de conseguir una correcta circulación entre todas las fibras. El sobrante será expulsado del molde a la hora de comprimirlo por los huecos que quedan entre las uniones de las tres piezas que lo componen.

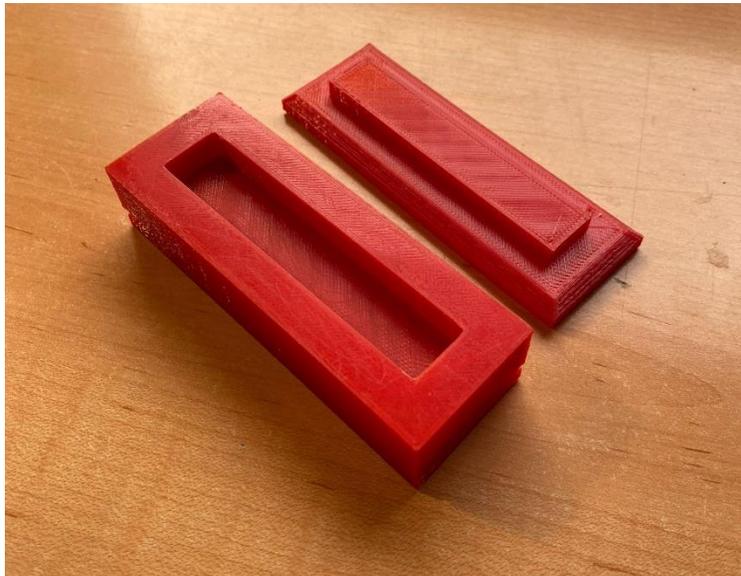


Figura 20. *Pesaje de la resina*

- Realización de la mezcla

Una vez tenemos pesadas las cantidades necesarias, procederemos a colocar la fibra y la resina en el molde.

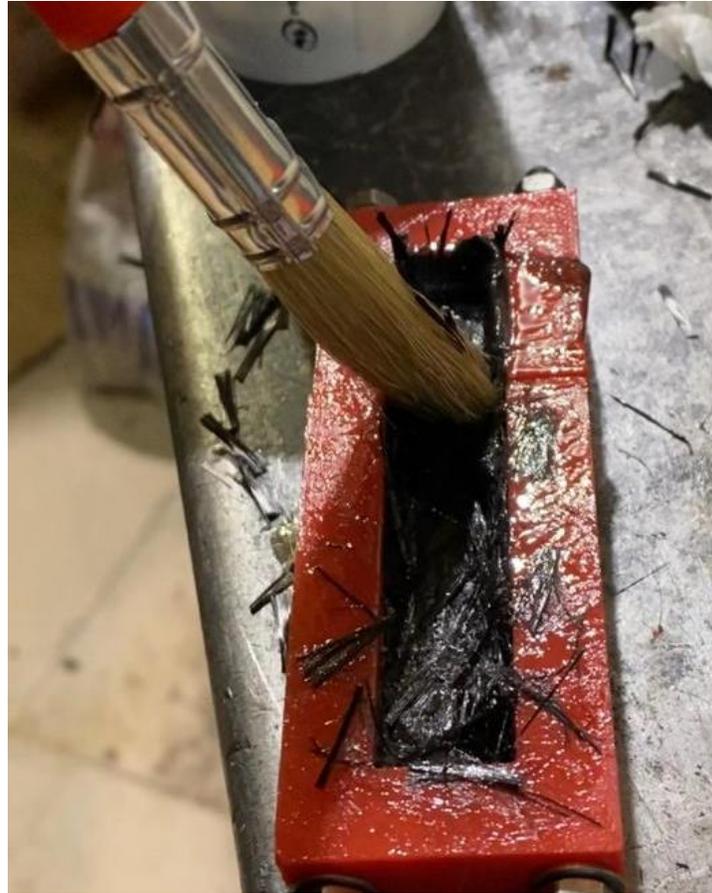
Para ello cogeremos la parte inferior e intermedia del molde y las uniremos, como se muestra en la Figura 21.



**Figura 21.** *Ensamblaje del molde*

A continuación, cogeremos una pequeña cantidad de fibra y la colocaremos en el interior del molde. Seguidamente recubriremos esa fibra con una capa de resina ayudándonos de una brocha. En este paso debemos asegurarnos de que todas las fibras quedan bien impregnadas de resina, de lo contrario, podrían aparecer bolsas de aire en el interior de las probetas.

Repetimos el proceso capa por capa hasta rellenar el molde con la cantidad de fibra y resina necesaria (Figura 22).



**Figura 22.** *Realización de la mezcla en el molde*

Una vez rellenado el molde, procederemos a cerrarlo con la tapa superior y lo colocaremos en el tornillo de banco.

Para conseguir una presión más uniforme y evitar dañar el molde con las mordazas del tornillo de banco, utilizamos unas pletinas de acero.

Además, para evitar la deformación del molde debida a la alta presión que se genera en su interior, colocamos un sargento entre la parte superior e inferior (Figura 23).

Una vez colocado en el tornillo de banco es importante que vayamos comprimiéndolo poco a poco, ya que la resina debe desplazarse por todo el interior, ocupando todos los huecos, y saliendo el sobrante poco a poco. Si lo comprimiéramos de manera rápida, se podría producir la rotura del molde, al tratarse de un molde impreso en 3D.



**Figura 23.** *Colocación del molde en el tornillo de banco*

El excedente de resina irá saliendo poco a poco por las juntas del molde como se puede observar en la (Figura 24).



**Figura 24.** *Excedente de resina*

- Curado y desmoldeo

Una vez colocado el molde en el tornillo de banco y cerrado correctamente procederemos a dejar curar la mezcla 24 horas. Este es el tiempo recomendado por el fabricante de la resina para obtener un curado correcto a una temperatura de alrededor de 22°C.

Una vez transcurridas las 24 horas se procede a extraer la pieza del molde. Para ello con ayuda de un destornillador de cabeza plana, hacemos palanca en los chaflanes del molde y poco a poco vamos despegando las distintas partes del molde.

Una vez tenemos la parte intermedia del molde con la probeta en su interior, nos ayudamos de un vástago y un martillo para dándole pequeños golpes extraer la probeta.

- Acabado final

Una vez extraídas las probetas del molde es necesario realizar unas operaciones de acabado superficial. Esto se debe a que en los bordes aparecen irregularidades producidas por el excedente de resina el cual escapa por los pequeños huecos que quedan entre la probeta y el molde.



**Figura 25.** *Probeta recién sacada del molde*

Para eliminarlos, en primer lugar, con ayuda de unas tijeras recortamos estos bordes lo máximo posible (Figura 26). A continuación, procedemos a realizar una operación de lijado, empleando lijas de distinto tamaño de grano, empezando por granos gruesos, hasta finalizar con granos finos al agua.

Una vez finalizado este proceso de lijado está lista para realizar las comprobaciones de fabricación.



**Figura 26.** *Recorte de bordes*

- Comprobaciones finales

Una vez tenemos las probetas con el acabado superficial adecuado, se procede a realizar una serie de comprobaciones y controles de calidad.

En primer lugar, se observa en profundidad si se han producido fallos o irregularidades en las distintas caras de la probeta. Si no existe ninguno, procedemos a medir las dimensiones, para comprobar que cumple con las medidas especificadas en el diseño. Para finalizar se pesan en la báscula de precisión y se anotan todos los datos en una tabla.

### 3.3 Fabricación de las probetas de aluminio

La fabricación de las probetas de aluminio se ha llevado a cabo a partir del diseño de la probeta de fibra de carbono mostrado anteriormente. Las dimensiones de la probeta de aluminio son iguales en longitud y anchura a las de carbono, y difieren en el espesor siendo en este caso de 1,5 mm.

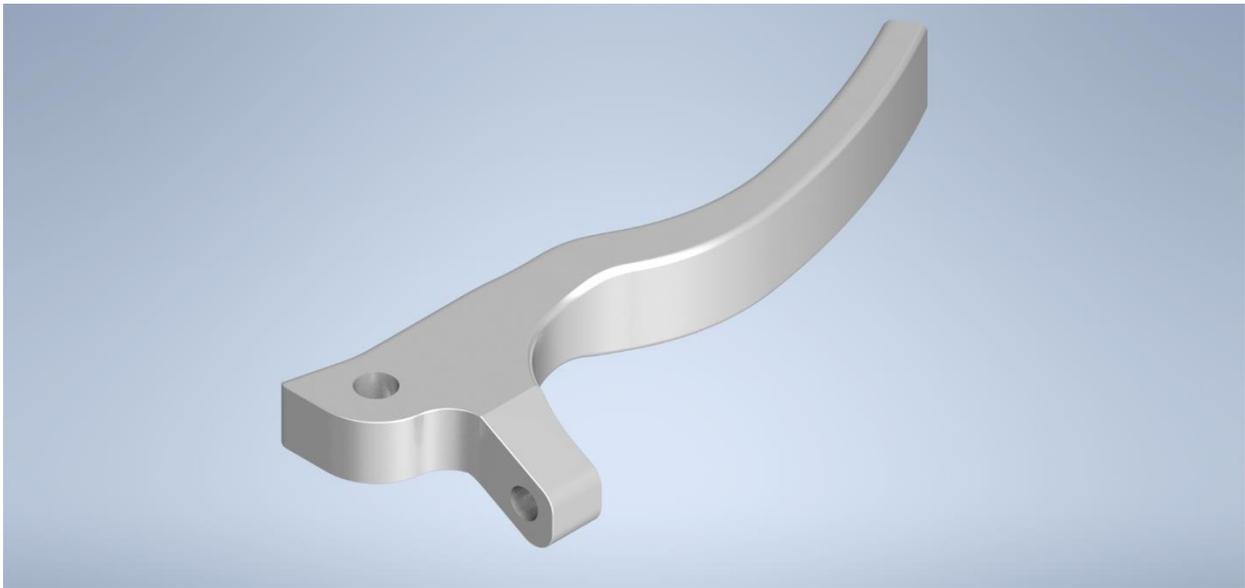
El proceso de fabricación consiste en marcar sobre la superficie de la chapa de manera precisa, las dimensiones de las probetas y, posteriormente, con una sierra de calar cortar cuidadosamente sobre las líneas marcadas como se muestra en la Figura 27. Una vez cortadas, se repasan los bordes con una lima para eliminar las imperfecciones.



**Figura 27.** *Corte probetas de aluminio*

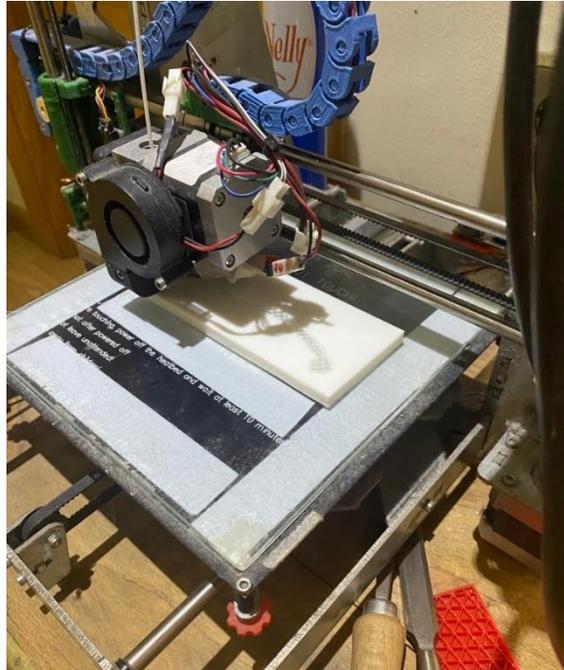
### 3.4 Fabricación de la maneta en fibra de carbono

La fabricación de la maneta en fibra de carbono se he llevado a cabo siguiendo el mismo método que el mostrado en el punto 3.2 en el que se mostraba la fabricación de las probetas. En primer lugar, es necesario diseñar la maneta en Inventor y los moldes correspondientes (Figura 28).



**Figura 28.** *Diseño de la maneta en Inventor*

Una vez se realizan estos diseños, se procede a fabricar los moldes mediante impresión 3D (Figura 29). Para conseguir un desmoldeo sencillo al igual que en el caso de las probetas, se aplica una capa de cinta de embalar sobre toda la superficie. Además, sobre esta cinta de embalar se aplica un tipo de parafina usado específicamente para el desmoldeo de piezas.



**Figura 29.** *Impresión de los moldes*

Con los moldes ya preparados, se procede a realizar el pesaje de la fibra y resina necesarias para este objeto como se muestra en la Figura 30.

Una vez realizada esta operación, se procede a introducir la resina y la fibra en el molde, asegurándose de que la fibra quede bien impregnada como se muestra en la Figura 31. En este punto se debe realizar una correcta distribución de la fibra en el molde, evitando que queden zonas vacías, sobre todo en las esquinas.



Figura 30. Preparación de los moldes, la fibra y la resina



Figura 31. Colocación de la fibra y la resina en el molde

Una vez introducida toda la fibra en el molde se cierra y se coloca cuidadosamente en el tornillo de banco (Figura 32). A continuación, se va comprimiendo poco a poco el molde con el fin de conseguir una correcta distribución de la fibra y resina.



**Figura 32.** *Colocación del molde en el tornillo de banco*

Transcurridas 24 horas, se procede a realizar la apertura del molde. Con ayuda de un destornillador y un martillo se va despegando poco a poco la tapa superior como se muestra en la Figura 33. Una vez abierta la tapa se extrae la maneta y se realiza una inspección visual de su estado (Figura 34).



Figura 33. *Desmoldeo*



Figura 34. *Maneta extraída del molde sin operaciones de acabado*

Una vez comprobado que la maneta se ha curado correctamente y no tiene fallos estructurales, se realizan las operaciones de acabo. Se lija la pieza hasta conseguir el acabado final quitando todos los bordes e impurezas que pudieran quedar como se muestra en la Figura 35.



**Figura 35.** *Lijado de la maneta*

Una vez lijada, se realiza los acabados finales, introduciendo un casquillo metálico en el agujero que alojará al eje como puede observarse en la Figura 36.



**Figura 36.** *Maneta acabada*

## 4 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MATERIALES

### 4.1 Ensayos de tracción

El ensayo de tracción realizado en este trabajo se ha regido por la norma ASTM D3039.

El equipo utilizado para la realización de este ensayo es una máquina de tracción universal de la marca SERVOSIS, modelo MUE-403. Las características de la máquina se muestran en la Tabla 14:

MÁQUINA	SERVOSIS MUE-403
Tipo de ensayos	Estáticos tracción, compresión y flexión
Frecuencia máxima	5 Hz
Capacidad de carga	100 kN
Amarre	Mordazas hidráulicas de cierre tipo cónico de hasta 200 bar

**Tabla 14.** Características técnicas máquina tracción

La velocidad a la que se ha llevado a cabo el ensayo ha sido de 0,02 mm/s, como indica la norma.

La presión de las mordazas se ha ajustado a 100 bar, la mínima que permite la máquina, con el fin de no dañar las probetas al ser de bajo espesor.

Se han ensayo tres tipos de probetas, dos de ellas fabricadas en fibra de carbono con distintas fracciones volumétricas y el otro tipo fabricadas en aluminio. En la Tabla 15 se muestran los tres tipos utilizados.

Nomenclatura	Material	% de fibra	% de resina	Tipo de aluminio	Número total de probetas
T	Fibra de carbono	60	40	-	3
N	Fibra de carbono	40	60	-	5
M	Aluminio	-	-	AW 5005	3

**Tabla 15.** Tipos de probetas ensayo de tracción

A continuación, se muestra unas tablas con las características de las probetas antes de ser ensayadas.

Probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Peso (g)
T1	80	15	2,80	5,16
T2	80	15	2,50	4,65
T3	80	15	2,50	4,36
Media	80	15	2,6	4,72

**Tabla 16.** Características probetas CFRP 60

Probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Peso (g)
N1	80	15	2,55	4,02
N2	80	15	2,55	3,94
N3	80	15	2,55	4,00
N4	80	15	2,50	3,62
N5	80	15	2,50	3,90
Media	80	15	2,53	3,89

**Tabla 17.** Características probetas CFRP 40

Probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Peso (g)
M1	80	15	1,50	4,61
M2	80	15	1,50	4,70
M3	80	15	1,50	4,71
M4	80	15	1,50	4,69
Media	80	15	1,50	4,70

**Tabla 18.** Características probetas Aluminio AW-5005

En los diferentes ensayos se ha seguido el mismo procedimiento con el fin de obtener la menor variabilidad de unos ensayos a otros.

En primer lugar, se coloca la probeta en las mordazas. Para ello, se amarra primero en la mordaza superior, y seguidamente se cierra de la mordaza inferior. La mordaza superior permanece siempre fija y es la inferior la que se desplaza aplicando el esfuerzo sobre la probeta. Este desplazamiento se ha configurado en los parámetros de la máquina para que sea de 0,02 mm/s. También ajustamos el sensor de paro de la máquina al 50 % de la carga y desactivamos la opción de extensómetro, ya que en nuestro ensayo no lo utilizaremos.

Con la probeta colocada en las mordazas se procede a poner a cero los sensores de posición y fuerza de la máquina y seguidamente se inicia el ensayo.

Una vez finalizado el ensayo se muestra por pantalla la curva fuerza-desplazamiento cuyos datos exportamos en formato Excel, para posteriormente calcular la curva tensión-deformación.

Cabe destacar la dificultad que surgió a la hora de colocar las probetas en las mordazas. Al tratarse de una mordaza de cierre tipo cónico, se produce un desplazamiento vertical a la vez que se cierra. Esta característica de la máquina nos ha ocasionado un problema, ya que al dejar fija la probeta en la mordaza superior y cerrar la mordaza inferior, se aplicaba una fuerza de compresión que dañaba las probetas. Finalmente, el servicio técnico de la marca nos proporcionó una solución, para evitar ese esfuerzo de compresión, modificando un parámetro de control.

Otro aspecto a destacar en relación con las mordazas, es que al tratarse de unas mordazas con cierre tipo cónico, no se consigue una colocación exacta de unas probetas a otras, quedando en algunas, más superficie amarrada que en otras. Este problema se podría haber solucionado con unas mordazas con un tipo de cierre lateral, en las que no se produce un desplazamiento vertical a la hora del cierre.

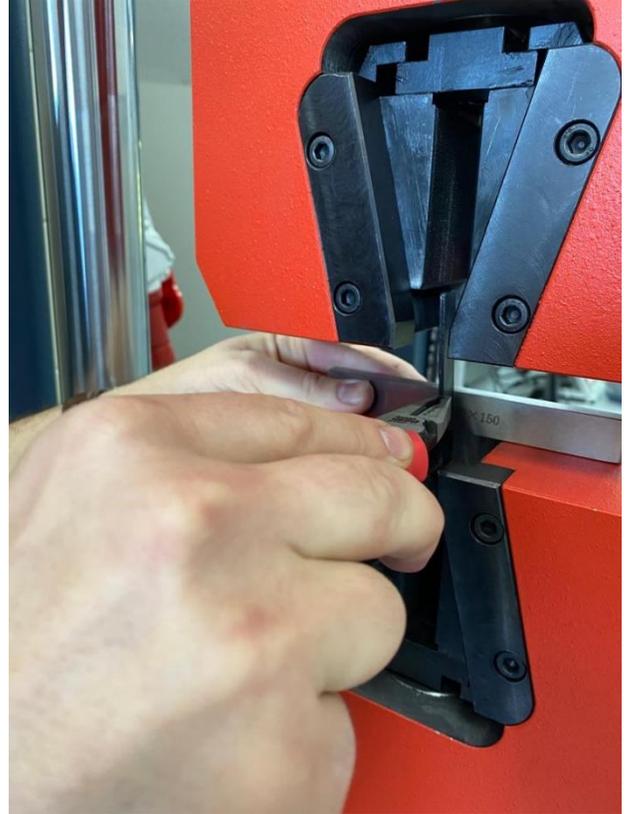


Figura 37. Colocación de la probeta en la máquina de tracción  
página 76 de 140

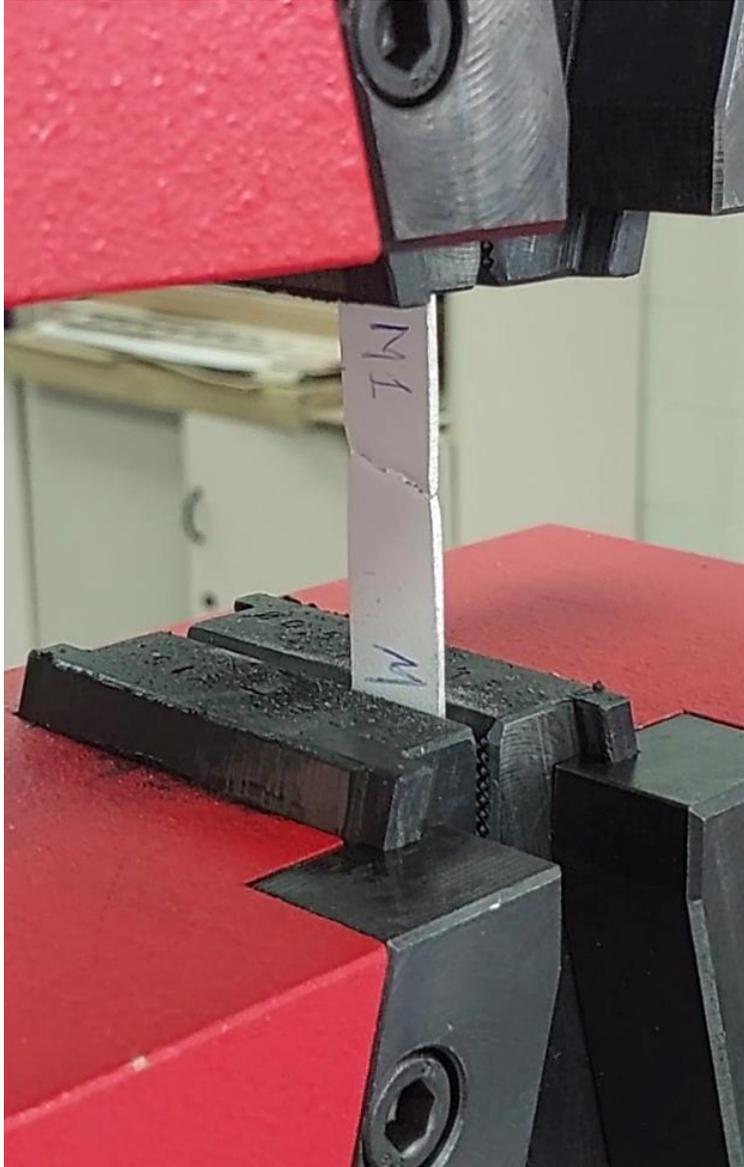


Figura 38. *Ensayo probeta de aluminio*

## 4.2 Ensayo de Charpy

Además de los ensayos de tracción, también se han llevado a cabo ensayos de impacto de baja velocidad mediante un péndulo de Charpy con el fin de determinar las resistencia y tenacidad frente a impacto del material.

El péndulo de Charpy utilizado es una máquina de impactos para probetas de pequeño tamaño fabricado por un estudiante de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Béjar. En la siguiente tabla se muestran las características del péndulo.

Máquina	Péndulo de Charpy
Longitud del péndulo	35 cm
Masa	1,807 kg
Angulo máximo	138,1 °

**Tabla 19.** *Características péndulo de Charpy*

Esta máquina permite realizar ensayos de impacto a un coste considerablemente inferior al de otras máquinas equivalentes comerciales. Esto se debe a que la manera de medir la energía absorbida por la probeta en la fractura se realiza comparando el ángulo máximo al que llega la máquina inmediatamente después del impacto, con el ángulo máximo que consigue la máquina en vacío. Para ello dispone de un medidor de ángulos, acoplado a su eje de rotación, a través del cual, con ayuda de una cámara, podemos conocer el ángulo máximo al que llega el péndulo.

Cabe destacar que con este sistema de medida no se obtiene la precisión que se llegaría a obtener con un medidor digital o una célula de carga. Sin embargo, nos puede ofrecer una muy buena aproximación.

En nuestro caso de estudio, con este sistema de medida nos es más que suficiente, pero en el caso de querer obtener una mayor precisión o realizar estudios con mayor rigor científico, sería necesario emplear algún tipo de medidor digital.

A continuación, se muestran unas imágenes de la máquina:

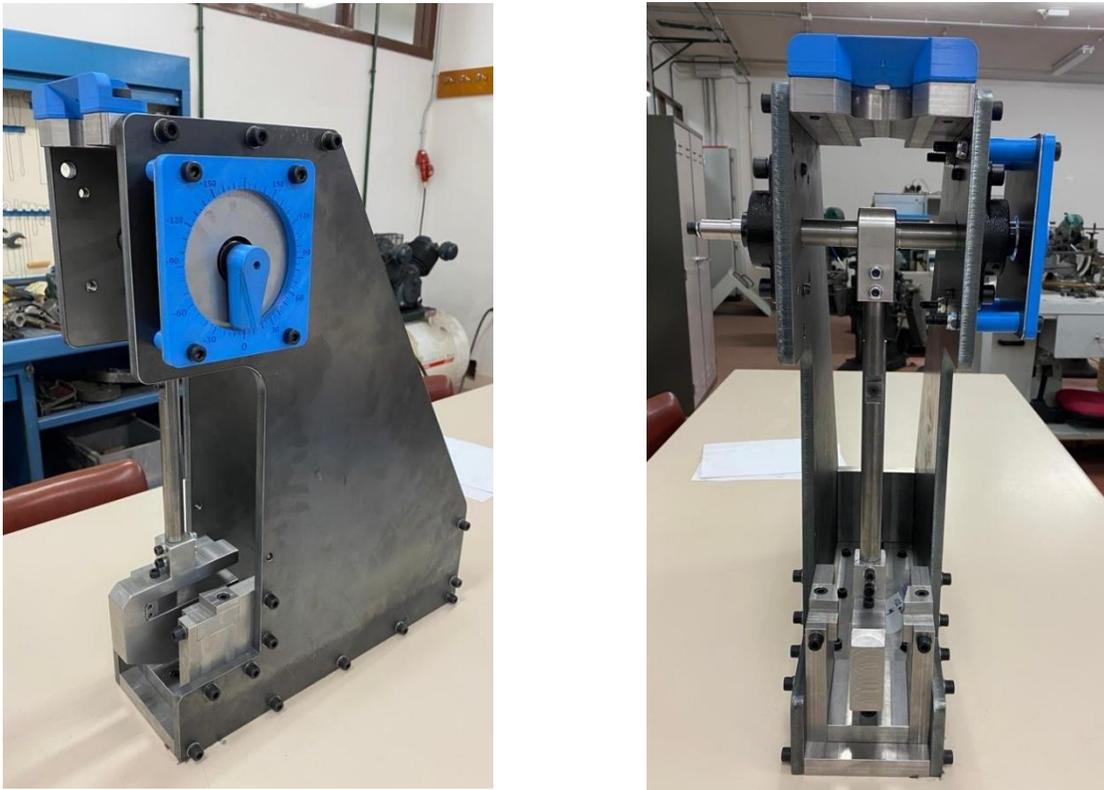


Figura 39. Péndulo de Charpy

Al igual que en el ensayo de tracción, se han realizado ensayos con tres tipos de probetas. En las siguientes tablas se muestran las características de las probetas ensayadas:

Nomenclatura	Material	% de fibra	% de resina	Tipo de aluminio	Número total de probetas
A	Fibra de carbono	60	40	-	3
B	Fibra de carbono	40	60	-	3
CA	Aluminio	-	-	AW 5005	4

Tabla 20. Características de las probetas ensayadas frente a impacto

Probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Peso (g)
A1	80	15	2,60	4,64
A2	80	15	2,60	4,65
A3	80	15	2,60	4,63
Media	80	15	2,60	4,64

**Tabla 21.** *Características probetas CFRP 60*

Probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Peso (g)
B1	80	15	2,55	3,99
B2	80	15	2,55	3,94
B3	80	15	2,55	4,00
Media	80	15	2,55	3,97

**Tabla 22.** *Características probetas CFRP 40*

Probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Peso (g)
CA1	80	15	1,5	4,73
CA2	80	15	1,5	4,51
CA3	80	15	1,5	4,62
CA4	80	15	1,5	4,56
Media	80	15	1,5	4,61

**Tabla 23.** *Características probetas Aluminio AW-5005*

El procedimiento que se ha llevado a cabo para el ensayo de las probetas comienza con la preparación de la máquina y el set de grabación. Para realizar la grabación del recorrido del péndulo utilizamos la cámara de un móvil, configurada a 240 fps. Es necesario que las condiciones de iluminación y enfoque sean los correctos para así obtener una imagen clara del medidor de ángulos. Una vez preparada la cámara, se comienza a grabar.

En primer lugar, se realiza una lanzada del péndulo con la máquina en vacío, es decir, sin ninguna probeta. Para ello se eleva el péndulo hasta la posición extrema y se deja caer. Una vez

el péndulo vuelve al estado de reposo, se observa a través del video el ángulo máximo al que ha llegado el péndulo en la primera oscilación, y se anota dicho ángulo.

A continuación, se realiza el mismo procedimiento, pero colocando una probeta en la zona de sujeción. Es necesario colocar la probeta con sumo cuidado con el fin de colocarla lo más simétrica posible en el soporte. Además, hay que tener precaución antes de realizar el ensayo, ya que la probeta saldrá disparada de la máquina, asegurándose de que no haya ninguna persona o ningún objeto en la parte posterior de la máquina.

Este mismo procedimiento se realiza para todas las probetas.



**Figura 40.** *Colocación de la probeta en el péndulo de Charpy*

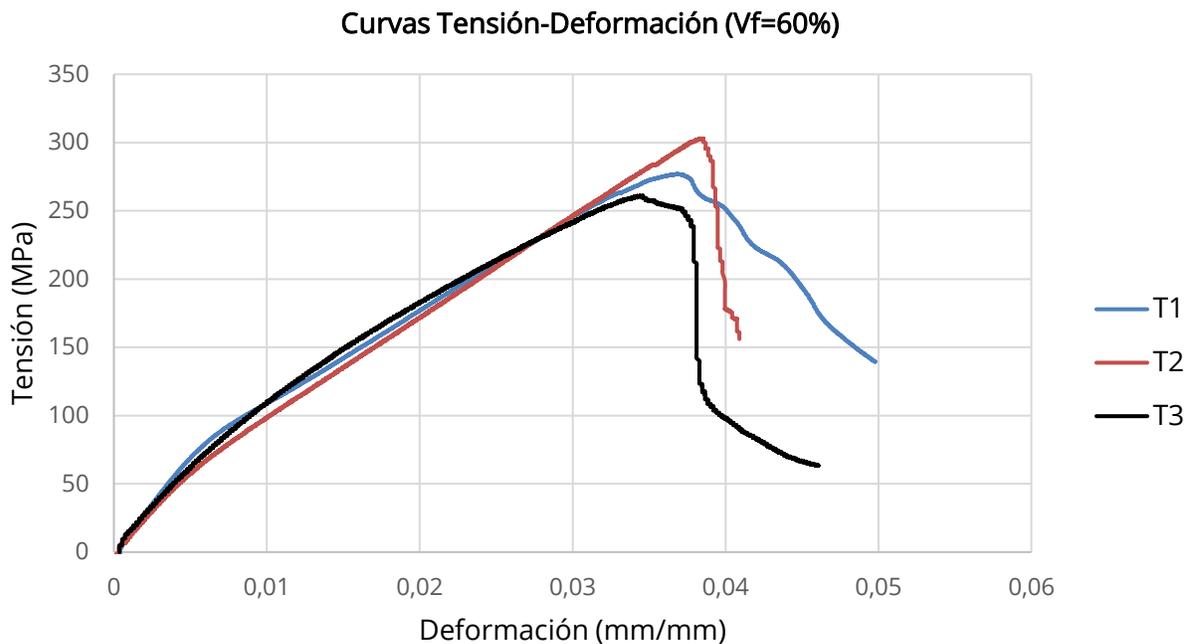
En el caso de las probetas de aluminio, se observaba que al impactarlas no rompían, por lo que decidimos realizarles una entalla a dos probetas.

Con los datos de todas las probetas, se realiza una hoja de Excel en la que se calculan los valores de energía absorbida por cada probeta aplicando los balances de energía mostrados en el apartado 5.2 del capítulo 2.

### 4.3 Resultados ensayo de tracción

#### 4.3.1 Probetas de fibra de carbono ( $V_f=60\%$ )

Se han ensayado tres probetas fabricadas en fibra de carbono con un contenido de fibras del 60%. Las curvas tensión-deformación se muestran en la Gráfica 3. Como podemos observar tienen son curvas bastante similares, con pendientes parecidas, pero existiendo bastante variabilidad en la tensión de rotura.



**Gráfica 3.** *Curvas Tensión-Deformación CFRP 60*

En la Tabla 24 se muestran los datos de módulo de elasticidad, tensión de rotura y deformación máxima.

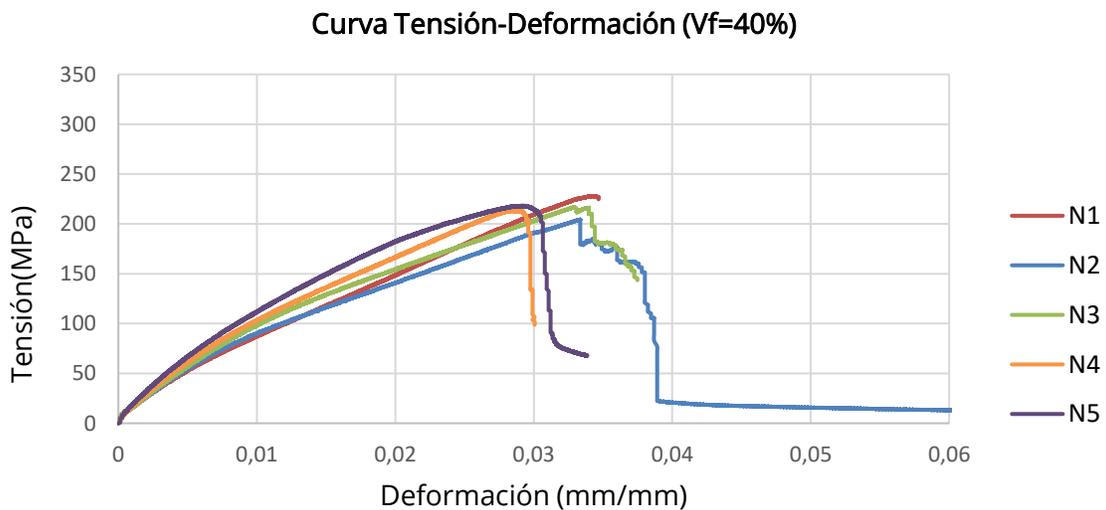
Fibra de carbono (Vf=60%)			
Probeta	Módulo de elasticidad (GPa)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación (%)
T1	14,88	281,90	3,65
T2	12,50	308,58	3,82
T3	12,11	261,24	3,40
Media	13,17	283,91	3,63
Desviación estándar	1,50	23,74	0,21

**Tabla 24.** Resultados ensayos de tracción CFRP 60

Podemos observar que los resultados no muestran valores muy elevados de módulos de elasticidad, como podría ocurrir con los laminados tradicionales.

#### 4.3.2 Probetas de fibra de carbono (Vf=40%)

Se han ensayado cinco probetas con un contenido de fibras de un 40%. Los resultados de las curvas tensión-deformación se muestran en la Gráfica 4. A diferencia de las anteriores, en estas probetas existe más variabilidad en las pendientes de las curvas.



**Gráfica 4.** Curvas Tensión-Deformación CFRP 40

Los resultados obtenidos de la curva tensión-deformación se muestran en la siguiente tabla.

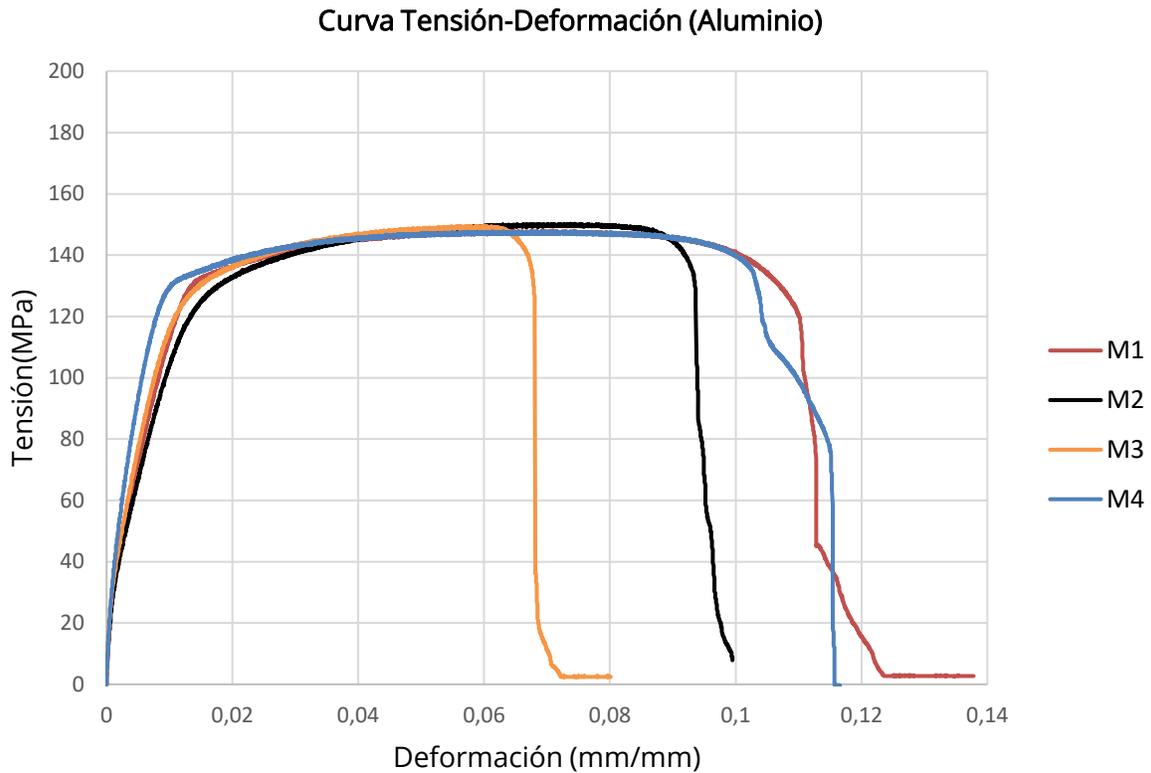
Fibra de carbono (Vf=40%)			
Probeta	Módulo de elasticidad (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación (%)
N1	10,40	228,13	3,42
N2	9,75	204,45	3,34
N3	10,26	217,21	3,29
N4	11,86	213,54	2,84
N5	12,19	218,32	2,91
Media	10,89	216,33	3,16
Desviación estándar	1,07	8,56	0,26

**Tabla 25.** *Resultados ensayo de tracción CFRP 40*

Observamos bastante variabilidad en la tensión de rotura del material. Esto se debe a que al tratarse de un método de fabricación artesanal y tener una orientación aleatoria de las fibras, es muy difícil obtener dos probetas exactamente iguales.

### 4.3.3 Probetas de Aluminio

Los resultados de la curva tensión-deformación de las probetas de aluminio se muestran en la Gráfica 5.



Gráfica 5. Curva Tensión-Deformación Aluminio

Los resultados obtenidos de las cuatro probetas ensayadas muestran curvas tensión-deformación muy similares. Sin embargo, existe variabilidad en la tensión de rotura de los distintos ensayos. Esto se puede deber a que, en la fabricación de las probetas, cortando la chapa de aluminio, quedaban pequeñas imperfecciones o hendiduras en los bordes de las probetas, actuando como concentradores de tensiones.

Aluminio			
Probeta	Módulo de elasticidad (GPa)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación (%)
M1	13,74	148,12	7,09
M2	14,23	150,29	7,38
M3	17,76	149,47	5,48
M4	20,24	147,85	6,13
Media	16,49	148,93	6,52
Desviación estándar	3,07	1,15	0,87

**Tabla 26.** Resultados de los ensayos de tracción del Aluminio

Los resultados del ensayo de tracción se muestran en la Tabla 26. Observamos que el módulo de elasticidad es bastante inferior al que ofrece en los datos técnicos del material de fabricante, que se muestran en la Tabla 11. Debido a esto, podemos pensar que algo no se ha realizado correctamente. En concreto, al no utilizar extensómetro, la deformación se ha medido a través del desplazamiento que realiza la máquina al realizar el ensayo. Puede que ese desplazamiento no sea lo suficientemente preciso, y por ello no se obtienen resultados similares a los del fabricante.

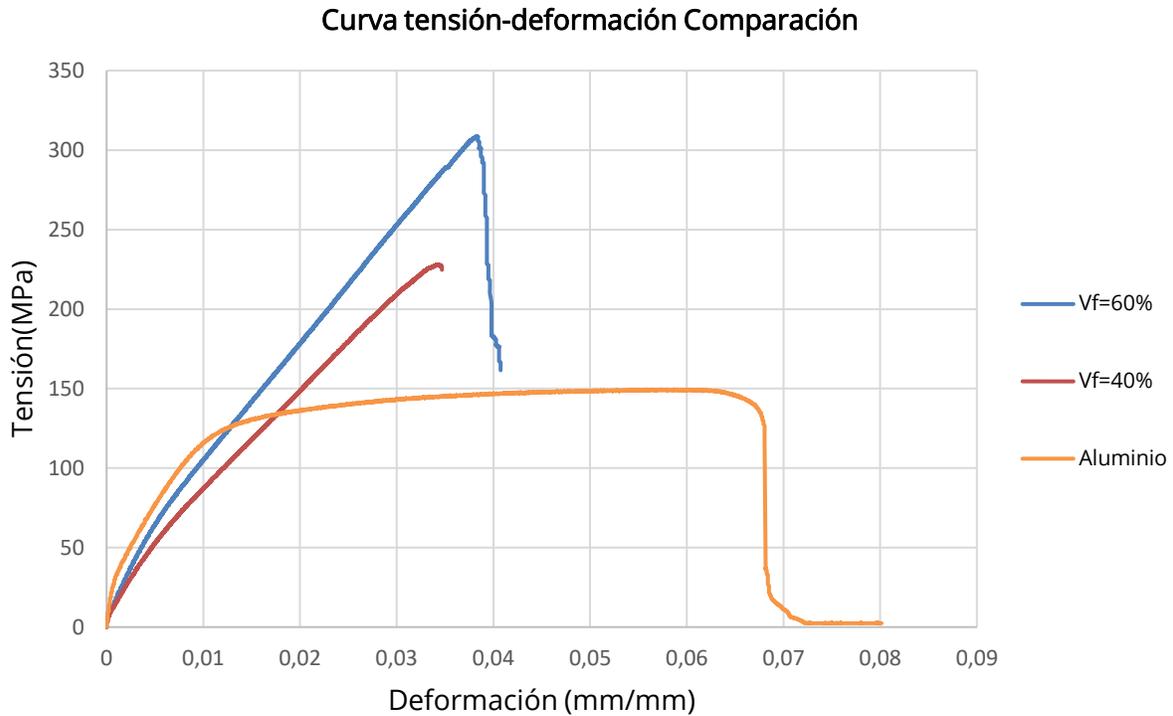
#### 4.3.4 Comparación entre fibra de carbono y aluminio

A continuación, se mostrará la comparación de los resultados obtenidos de los ensayos con fibra de carbono y aluminio.

En la Gráfica 6 se muestran las curvas tensión-deformación de los tres materiales. Observamos como la curva del aluminio tiene una mayor pendiente en su zona elástica. Una vez se sobrepasa la zona elástica, el aluminio comienza a plastificar a una tensión casi constante. Sin embargo, la fibra de carbono mantiene una pendiente prácticamente constante desde la zona elástica hasta su punto de rotura. Esto demuestra el carácter frágil del material.

En cuanto a la resistencia máxima se observan bastantes diferencias en los tres ensayos. Vemos como la fibra de carbono rompe cuando se ha deformado la mitad de lo que lo hace el

aluminio. Sin embargo, la tensión de rotura es muy superior para la fibra de carbono, siendo el doble en uno de los casos que la resistencia del aluminio.



En la Tabla 27 se recogen los valores medios de cada uno de los materiales.

Material	Módulo de elasticidad (GPa)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación (%)
CFRP (60%)	13,17 ± 1,50	283,9 ± 23,74	3,63 ± 0,21
CFRP (40%)	10,89 ± 1,07	216,33 ± 8,56	3,16 ± 0,26
Aluminio	16,49 ± 3,70	148,93 ± 1,15	6,52 ± 0,87

**Tabla 27.** Resultados del módulo elástico, la tensión de rotura y la deformación de rotura en función del tipo de material.

Si comparamos los datos de los materiales compuestos, observamos como aumentando el contenido de fibras en un 20%, se obtienen mejores propiedades mecánicas. En cuanto al módulo de elasticidad se obtiene una mejora del 17,31%, en la tensión máxima del material un

23,8% y en la deformación un 12,9%. Con estos datos confirmamos como al aumentar el contenido de fibras se obtienen mejoras, sin perjudicar excesivamente en el peso del material.

Otra comparación interesante que se puede realizar de los datos obtenidos es la relación entre la resistencia máxima del material y el peso.

Material	Tensión de rotura (MPa)	Peso (g)
CFRP (60%)	283,9 ± 23,74	4,72 ± 0,4
CFRP (40%)	216,33 ± 8,56	3,89 ± 0,16
Aluminio	148,93 ± 1,15	4,67 ± 0,05

**Tabla 28.** Resultados de la tensión de rotura y el peso de las probetas.

Si comparamos el CFRP (60%) y el aluminio, observamos que para un peso muy similar la resistencia máxima es un 47,5% superior en el caso del material compuesto. Por esta razón, los materiales compuestos se emplean cada vez más en situaciones en las que el peso sea realmente un factor determinante.

Si realizamos esta comparación teniendo en cuenta el contenido de fibra, podemos observar cómo aumentando la cantidad de fibras en un 20%, se aumenta el peso en un 18% y se obtiene una mejora de la resistencia de un 23,8%. Por lo tanto, podemos afirmar que se obtiene una mejora considerable a medida que se aumenta el contenido fibras.

#### 4.4 Resultados de los ensayos de impacto

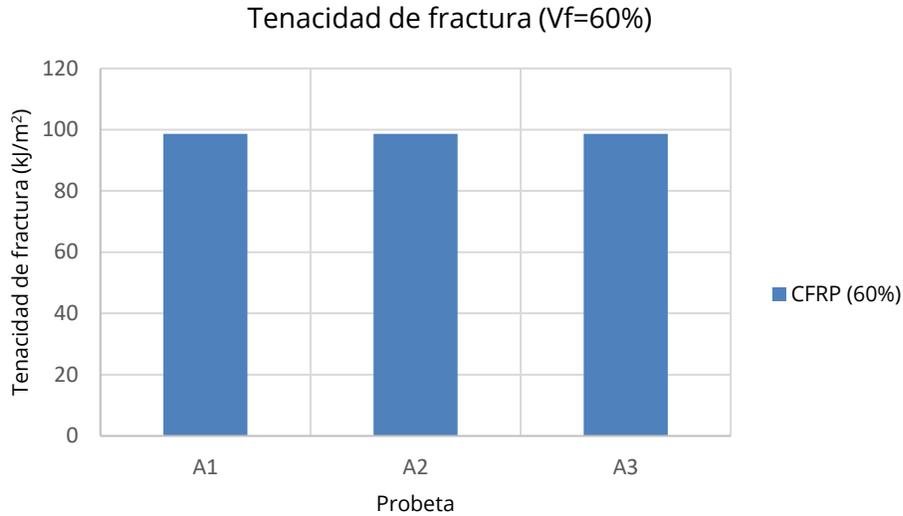
A continuación, se mostrarán los resultados de los distintos ensayos de Charpy realizados.

##### 4.4.1 Fibra de carbono (Vf=60%)

Los resultados obtenidos para este ensayo se muestran en la Gráfica 7 y en la Tabla 29.

Podemos observar que la variabilidad obtenida es 0. Esto se debe a que la precisión de medida del instrumento de ensayo no es elevada por lo que, si se empleará algún tipo de medidor electrónico, seguramente existiría alguna diferencia de unas probetas a otras.

Sin embargo, con estos datos podemos hacernos una idea de la energía que se necesita para romper el material.



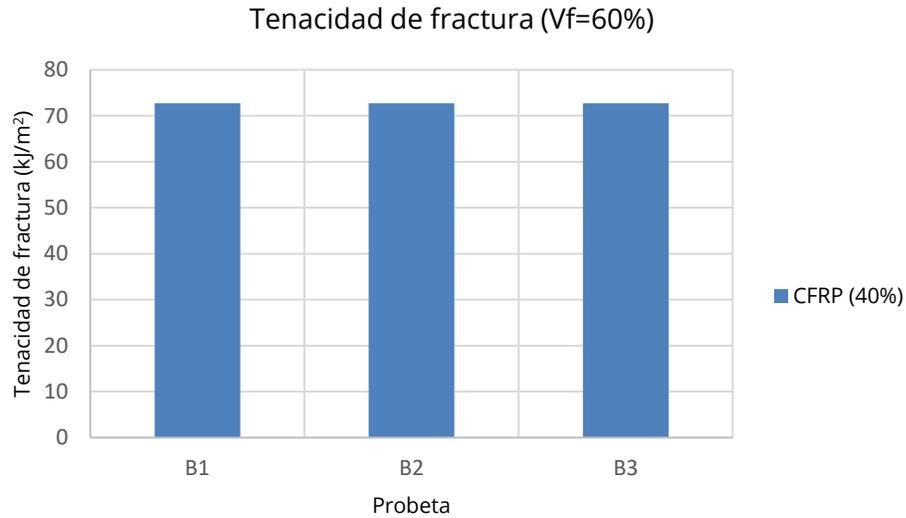
**Gráfica 7. Ensayo de Charpy CFRP 60**

Probeta	Tenacidad de fractura (kJ/m <sup>2</sup> )
A1	98,63
A2	98,63
A3	98,63
Media	98,63
Desviación estándar	0

**Tabla 29. Resultados ensayo de Charpy CFRP 60**

#### 4.4.2 Fibra de carbono (Vf=40%)

A continuación, en la Gráfica 8 y Tabla 30, se mostrarán los resultados obtenidos del ensayo de Charpy en las probetas fabricadas en fibra de carbono con un contenido de fibras del 40%.



**Gráfica 8.** *Ensayo de Charpy CFRP 40*

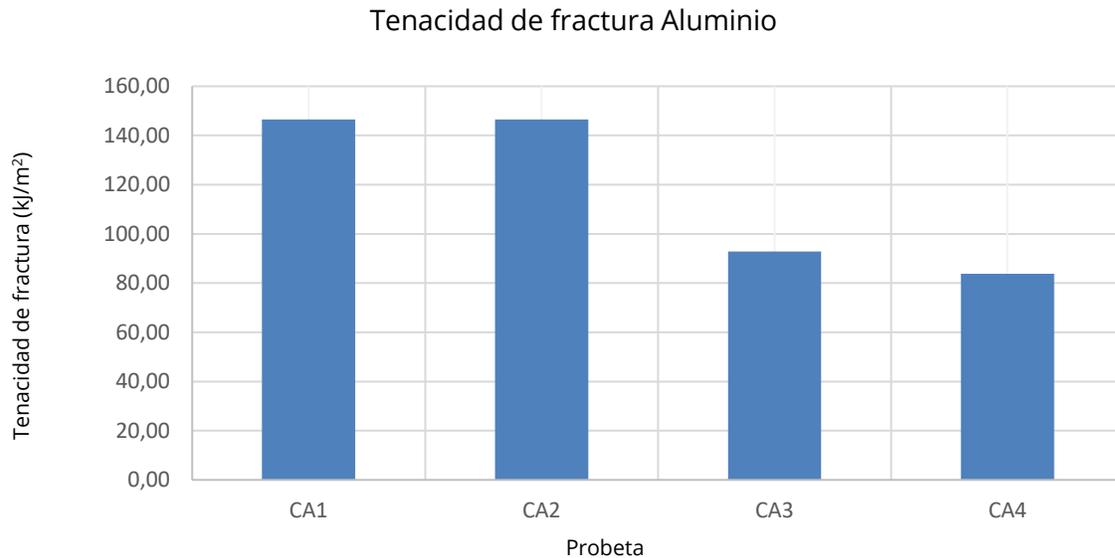
Probeta	Tenacidad de fractura (kJ/m <sup>2</sup> )
B1	72,71
B2	72,71
B3	72,71
Media	72,71
Desviación estándar	0

**Tabla 30.** *Resultados ensayo de Charpy CFRP 40*

Al igual que en el caso mostrado en el punto 5.2.1, la variabilidad es cero por lo comentado anteriormente.

#### 4.4.3 Aluminio

Los resultados obtenidos del ensayo de Charpy para las probetas de aluminio se muestran en la Gráfica 9 y Tabla 31.



**Gráfica 9.** *Ensayo de Charpy Aluminio*

Probetas Aluminio sin entalla	
Probeta	Tenacidad de fractura (kJ/m <sup>2</sup> )
CA1	146,51
CA2	146,51
Media	146,51
Desviación estándar	0

**Tabla 31.** *Resultados ensayo de Charpy Aluminio*

Al observar que las probetas no rompían decidimos realizar una entalla en las siguientes probetas. Los resultados de estas probetas se muestran en la Gráfica 9 y en la Tabla 32.

Probetas Aluminio con entalla	
Probeta	Tenacidad de fractura (kJ/m <sup>2</sup> )
CA3	92,84
CA4	83,83
Media	88,34
Desviación estándar	6,37

**Tabla 32.** *Resultados ensayo de Charpy Aluminio con entalla*

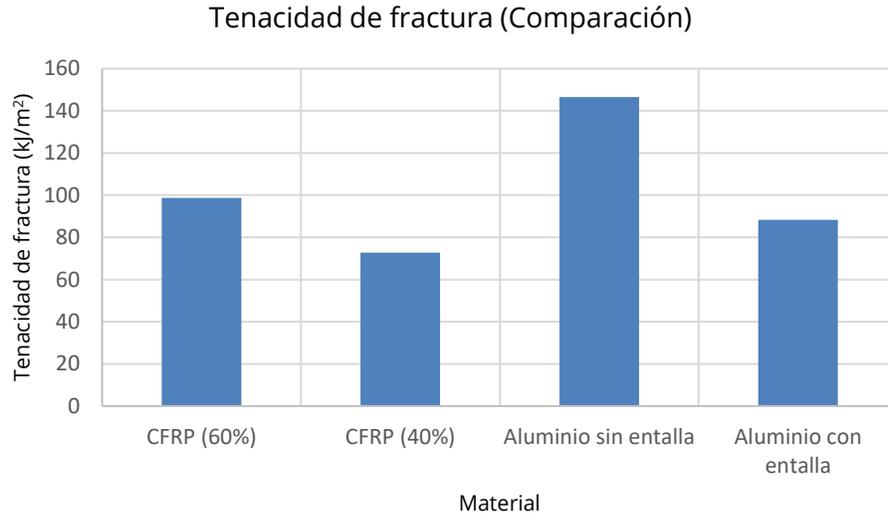
Podemos observar como la entalla afecta directamente al comportamiento frente a impacto del aluminio. Esto se debe a que en el punto donde se sitúa la entalla se produce una concentración de tensiones, facilitando la rotura. Sin embargo, a pesar de realizar la entalla en las probetas, no conseguimos que rompieran, como se observa en la Figura 41.



**Figura 41.** *Probeta después de ensayo de Charpy*

#### 4.4.4 Comparación fibra de carbono y aluminio

En la Gráfica 10 y en la Tabla 33, se muestra la comparación de los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados a los distintos materiales.



**Gráfica 10.** Comparación ensayo de Charpy

Material	Tenacidad de fractura (kJ/m2)
CFRP (60%)	98,63
CFRP (40%)	72,71
Aluminio sin entalla	146,51
Aluminio con entalla	88,34

**Tabla 33.** Resultados ensayo de Charpy

Si analizamos cómo se comporta el material compuesto en función del contenido de fibras de refuerzo, observamos que con un aumento del contenido de fibras del 20%, obtenemos un aumento de la tenacidad de fractura del 26,2%. Esto quiere decir que al aumentar el contenido de fibras se necesita más energía para romper el material.

Si comparamos el CFRP (60%) con el aluminio, observamos que el aluminio requiere de mucha mayor energía para llegar a romperse. Esto nos demuestra que la fibra de carbono es un

material mucho menos dúctil que el aluminio, el cual es capaz de absorber mayor cantidad de energía antes de romperse.

## 5 SIMULACIONES

El estudio analítico del comportamiento de materiales compuestos es complejo debido a la anisotropía que presentan estos materiales, por lo que, en su lugar, es habitual emplear métodos numéricos, como es el caso del método de los elementos finitos.

Este método se basa en un proceso de discretización, el cual permite analizar cualquier geometría sin restricciones en las aplicaciones de las condiciones de contorno y las cargas. Debido a esto es muy utilizado en la industria ya que permite reducir en gran medida el tiempo y los costes al realizar ensayos de manera virtual, pudiendo analizar multitud de modelos con el fin de elegir el más adecuado.

En este Trabajo Fin de Grado, a pesar de que se ha empleado material compuesto con fibras distribuidas aleatoriamente, lo cual le confiere al material un comportamiento isótropo, se ha elegido el software comercial Abaqus Standard para simular el comportamiento de la probeta. El uso de este tipo de programas permite analizar piezas con formas complejas, como es el caso de una maneta de freno, así como evaluar el efecto que tiene el tipo de elemento finito en los resultados.

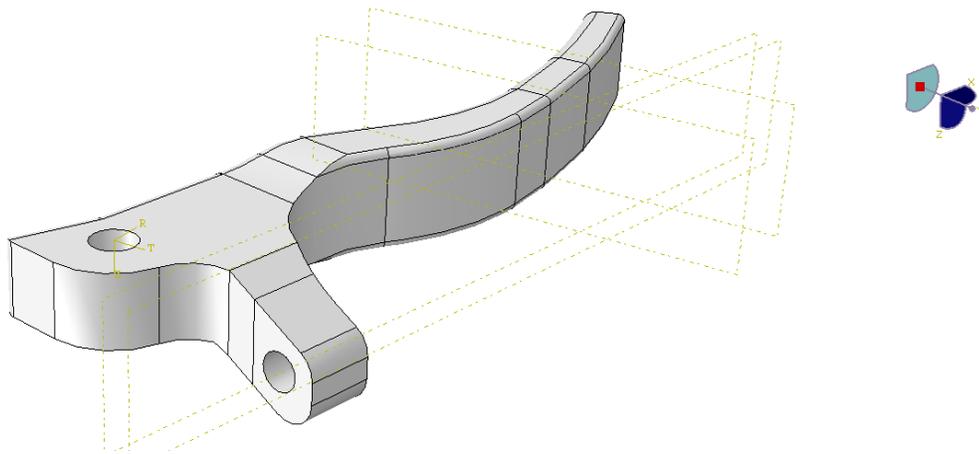
### 5.1 Descripción del modelo

Para la realización de este trabajo se han empleado tres modelos distintos. Estos modelos se diferencian en los materiales utilizados para su conformación. Dichos materiales son los estudiados a lo largo del trabajo. Uno de los modelos está fabricado en fibra de carbono con un contenido de fibras del 60%, otro con un contenido de fibras del 40 % y el último modelo está fabricado en aluminio AW 5005.

A continuación, se mostrará detalladamente el proceso de desarrollo de los modelos numéricos:

### 5.1.1 Geometría

La geometría empleada en los modelos que se calcularán representa la maneta de freno de una motocicleta. Se trata de una geometría complicada, con gran cantidad de curvas y varios cambios de sección. El modelo se ha llevado a cabo a partir de la importación de un plano diseñado en Inventor, al cual, con operaciones de extrusión, vaciado y redondeo se ha dado forma hasta la obtención de la geometría completa.



**Figura 42.** *Maneta de freno*

### 5.1.2 Materiales

Se van a realizar simulaciones con tres modelos distintos en función del tipo de material.

Los materiales empleados son la fibra de carbono y el aluminio. Existe una gran diferencia entre estos dos tipos de materiales. La fibra de carbono es un material frágil mientras que el aluminio es un material dúctil. Estas características deben tenerse en cuenta a la hora de realizar la simulación para obtener resultados reales y precisos.

La simulación se llevará a cabo con las propiedades de los materiales obtenidas de los ensayos realizados anteriormente. El programa Abaqus nos permite crear el material necesario para la simulación a partir de sus propiedades mecánicas.

A continuación, se describe la creación de los materiales utilizados:

- Fibra de carbono: al tratarse de un material compuesto reforzado por fibras cortas y orientadas aleatoriamente, consideraremos que tiene un comportamiento isótropo. Los ensayos han demostrado además que es un material frágil.

Con estas características crearemos en Abaqus un material con un comportamiento elástico lineal.

Se han realizado simulaciones para dos tipos de fibra de carbono en función del contenido de fibras.

Las propiedades elásticas de la fibra de carbono que se utilizaran en la simulación se muestran en la Tabla 34.

Propiedades	( $V_f=60\%$ )	( $V_f=40\%$ )
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,52	1,38
E (GPa)	13,17	10,89
$\nu$	0,25	0,25

**Tabla 34.** *Propiedades materiales del material compuesto en función de la fracción volumétrica de fibras.*

- Aluminio: El aluminio tiene un comportamiento elastoplástico, es decir, tiene una primera parte en la que se comporta de manera elástica hasta el punto de fluencia a partir del cual comienza la plastificación, produciéndose un endurecimiento del material hasta la rotura.

Las propiedades elastoplásticas del aluminio se muestran en la siguiente tabla.

Propiedades	Aluminio
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,7
E (GPa)	69,5
Y (Mpa)	125
$\nu$	0,3

**Tabla 35.** *Propiedades material Aluminio*

El módulo elástico empleado es el que nos facilita el fabricante, ya que el obtenido en los ensayos de tracción es muy inferior al teórico.

### 5.1.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son otro de los aspectos clave para que los resultados de una simulación sean correctos. Para poder aplicar bien las condiciones de contorno a la geometría que queremos simular debemos conocer su funcionamiento.

La maneta es el elemento que facilita el accionamiento de la bomba hidráulica que controla el sistema de frenado de una motocicleta. Para ello, lleva acoplado un accionador el cual empuja el pistón de la bomba. Cuando se realiza la acción de frenado, la maneta gira sobre un eje que la mantiene en su posición accionando el pistón a través del empujador que lleva acoplado.

Para observar correctamente el funcionamiento en la Figura 43 y Figura 44 se muestra una secuencia del accionamiento de la maneta, en el que se ve visualmente lo descrito en el párrafo anterior.

Una vez conocemos el funcionamiento de la maneta, podemos aplicar las condiciones de contorno necesarias para asemejar lo máximo posible la simulación a la realidad.



Figura 43. Esquema de la maneta sin accionar

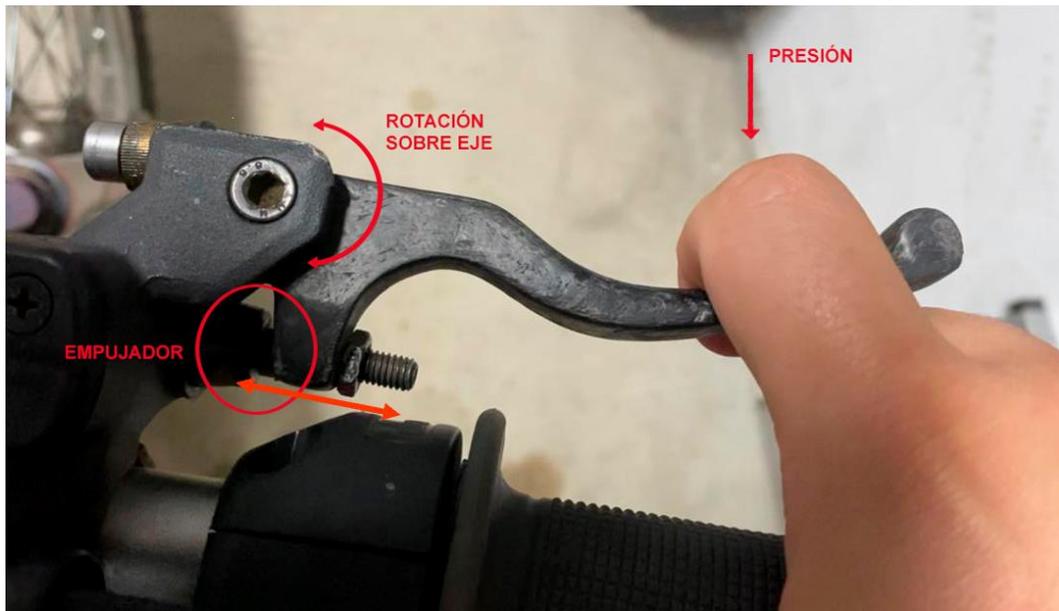
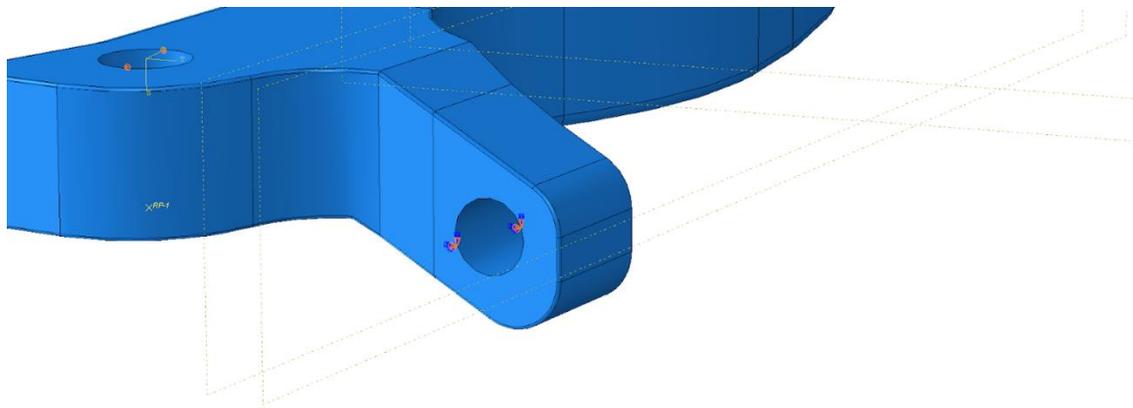


Figura 44. Esquema de la maneta accionada

Como observamos en la Figura 44, cuando se aplica una presión sobre la maneta, esta gira y acciona el pistón de la bomba. Si consideramos que la sollicitación máxima de la maneta ocurrirá cuando se produzca una frenada de emergencia ejerciendo la presión máxima que permite la bomba, podemos decir que la zona de la maneta donde va acoplado el accionador, se encontrará en una situación de empotramiento.

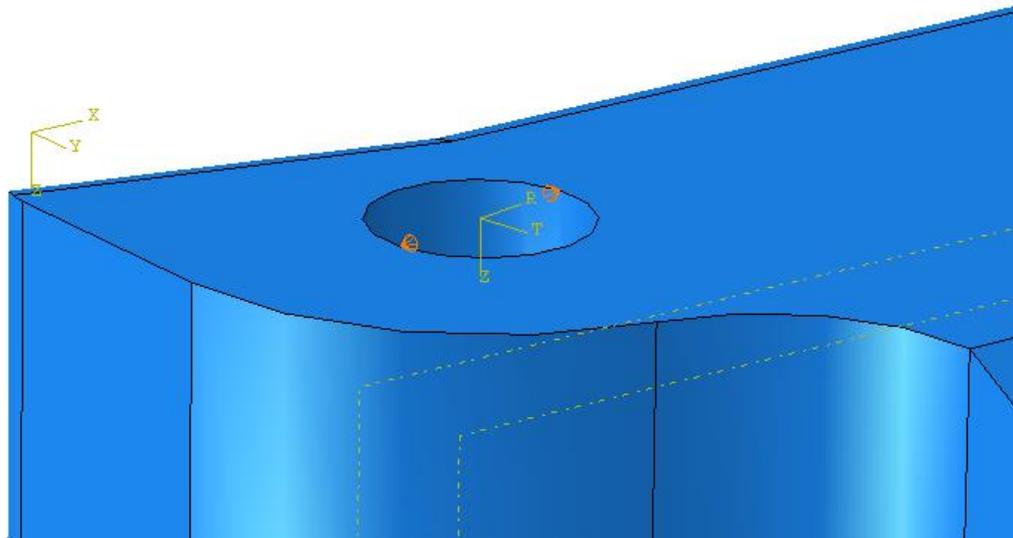
Realizadas estas consideraciones hemos aplicado una condición de contorno de empotramiento perfecto sobre el agujero donde va colocado el empujador como puede observarse en la Figura 45.



**Figura 45.** *Condiciones de contorno*

Existe además otra restricción de movimiento que se produce en el eje sobre el cual gira la maneta. Este eje limita el desplazamiento en el plano horizontal XY y el desplazamiento vertical sobre el eje Z.

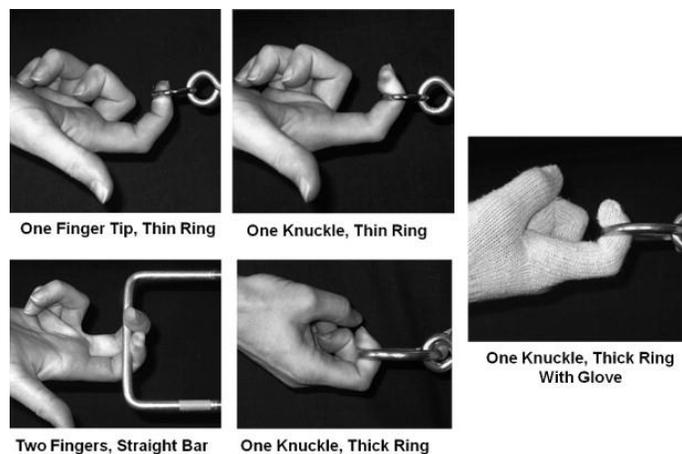
Para aplicar las condiciones de contorno que limiten esos movimientos ha sido necesario crear en el modelo un nuevo sistema de coordenadas en el centro del eje. A partir de este nuevo sistema de coordenadas, se han aplicado unas condiciones de contorno que limitan el desplazamiento en la dirección del radio del eje. Esto va a permitir que el modelo gire sobre el eje Z pero limitará el desplazamiento a lo largo del eje R. En la Figura 46 se muestra.



**Figura 46.** *Condiciones de contorno*

Las cargas aplicadas sobre el modelo corresponden a la presión que ejerce el dedo al accionar la maneta. Para conocer la fuerza que pueden ejercer los dedos de la mano se ha hecho uso de un artículo científico de la Universidad de Windsor publicado en la revista científica *International Journal of Industrial Ergonomics*, en el cual se estudia la fuerza máxima que puede ejercer un dedo en un esfuerzo de tracción.

El estudio muestra la fuerza máxima que puede ejercer un dedo en diferentes posiciones. En la Figura 47 se puede observar las diferentes condiciones en las que se ha realizado el ensayo.



**Figura 47.** *Estudio fuerza de los dedos*

Los resultados que arroja el estudio miden la fuerza en Newton y se muestran en la Tabla 36.  
*Fuerza de los dedos* Tabla 36 .

Condición		Fuerza (N)	Desviación Estándar
1. Dedo	Nudillo-Anillo estrecho	94.5	28.7
	Nudillo-Anillo ancho	109.7	28.1
	Punta del dedo-Anillo estrecho	59.5	21.4
2. Dedos	Nudillo-Anillo ancho	203.9	57.6
	Barra recta	196.7	56.4
3. Dedos en barra recta		250.3	61.7
4. Dedos en barra recta		268.7	77.2

**Tabla 36. Fuerza de los dedos (Joel A & Jim R, 2011)**

La situación que más se asemeja a nuestro modelo es la condición de un nudillo con agarre ancho. En la tabla podemos observar que la fuerza máxima que puede ejercer el dedo en esa condición es de 109,7±28,1 N.

Para aplicar la carga sobre el modelo, vamos a suponer la carga máxima que muestra el estudio, en este caso 137,8 N, con el fin de crear las condiciones más desfavorables.

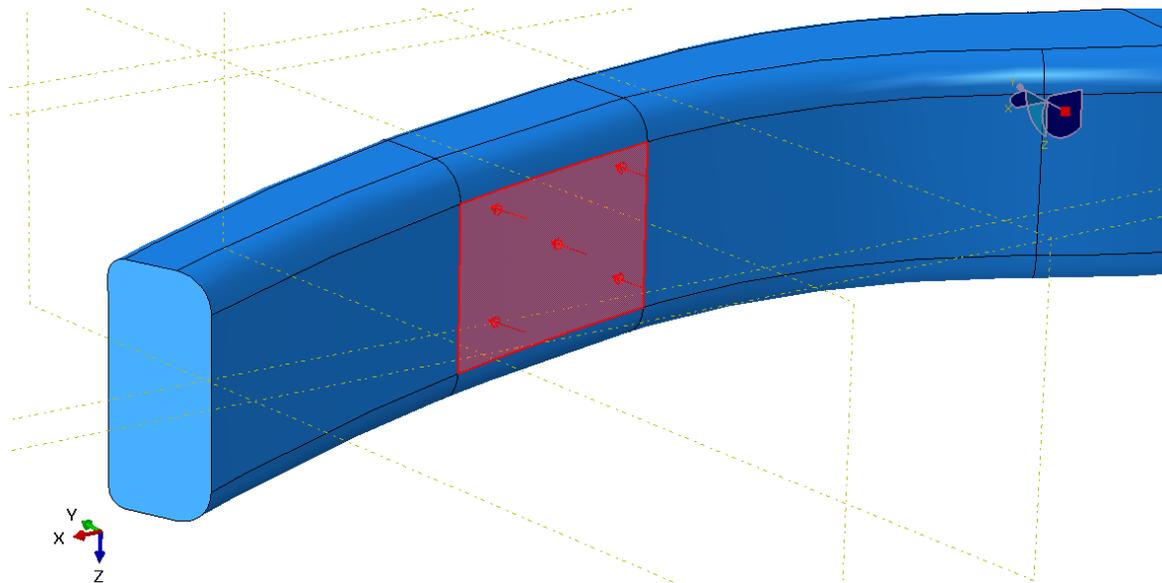
La superficie sobre la que se aplica la fuerza en el modelo es de 10x15 mm. Estas medidas corresponden a la dimensión que tiene la maneta sobre ese punto y el ancho del dedo cuando se está aplicando la fuerza.

Por lo tanto, la presión que se aplicará sobre el modelo es la siguiente:

$$P = \frac{F}{A}$$

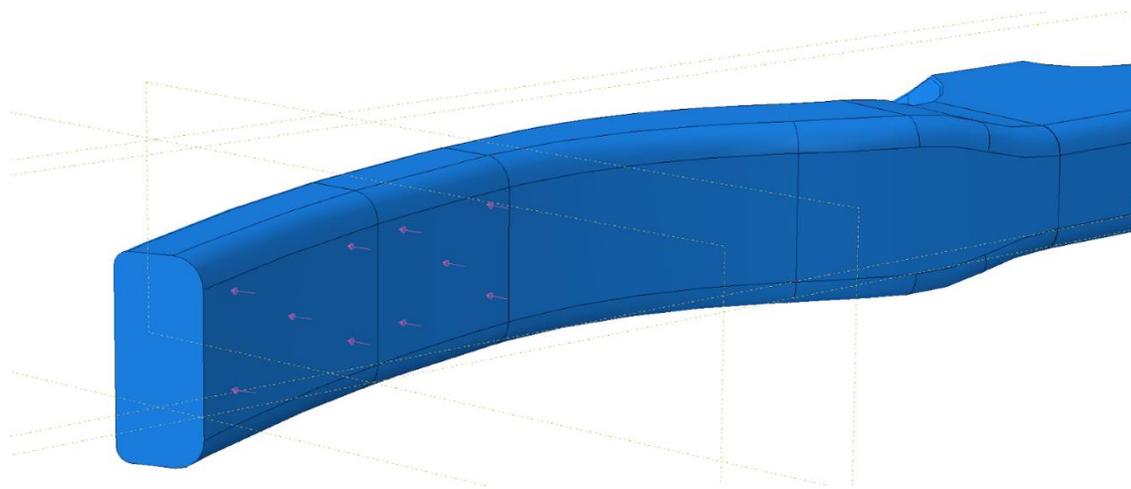
$$P = \frac{137,8}{10 \cdot 15} = 0,92 \text{ MPa}$$

Para aplicar la carga sobre el modelo seleccionamos una carga de tipo presión, en la que introducimos el valor en MPa.



**Figura 48.** *Condiciones de contorno. Carga*

En ocasiones, también se acciona la maneta de freno utilizando dos dedos. Debido a esto, aplicaremos la misma presión, pero en este caso distribuida sobre toda la superficie. De esta manera veremos que sollicitación es más desfavorable y con ella realizaremos todas las simulaciones.



**Figura 49.** *Condiciones de contorno. Carga dos dedos*

#### 5.1.4 Mallado

El mallado es una de las partes más importantes a la hora de realizar simulaciones con elementos finitos. En función de la calidad de la malla, una simulación se acercará al comportamiento que experimenta el modelo en la realidad o no. Debido a esto es imprescindible dedicarle tiempo a este punto.

La operación de mallado consiste en dividir el modelo en un número finito de subregiones. Cuanto mayor es el número de subregiones creadas, menor será el error cometido por el solucionador, pero requerirá un mayor uso de recursos.

A la hora de realizar el mallado se deberá elegir el tipo de geometría que queremos emplear para dividir el modelo. Existen diversos tipos como son los elementos triangulares o elementos rectangulares. En función del tipo de geometría de la pieza, unos elementos se adaptarán mejor que otros. Por ejemplo, para modelos con geometrías que contengan zonas curvas, se adaptará mejor los elementos de tipo triangular. En cambio, si el modelo tiene geometrías más rectas, se pueden emplear elementos rectangulares que, además, consumen menos recursos.

También es necesario tener en cuenta el orden de interpolación. Las geometrías están definidas por polinomios y en función del grado de estos, se obtendrán aproximaciones mejores o peores. En abaqus existen dos tipos de elementos, los lineales o de primer orden, tienden a rigidizar en exceso el modelo y no se adaptará correctamente a determinados movimientos y los cuadráticos o elementos de segundo orden que tienen mejor adaptabilidad a todo tipo de movimientos y se conseguirán simulaciones más precisas.

En nuestro caso para la realización de un correcto mallado, realizaremos un análisis de sensibilidad de malla. Este análisis consistirá en realizar diferentes simulaciones modificando parámetros del control de malla. El objetivo será obtener distintos resultados que converjan hacia un mismo valor. De esta manera podemos asegurarnos de que el mallado es el correcto.

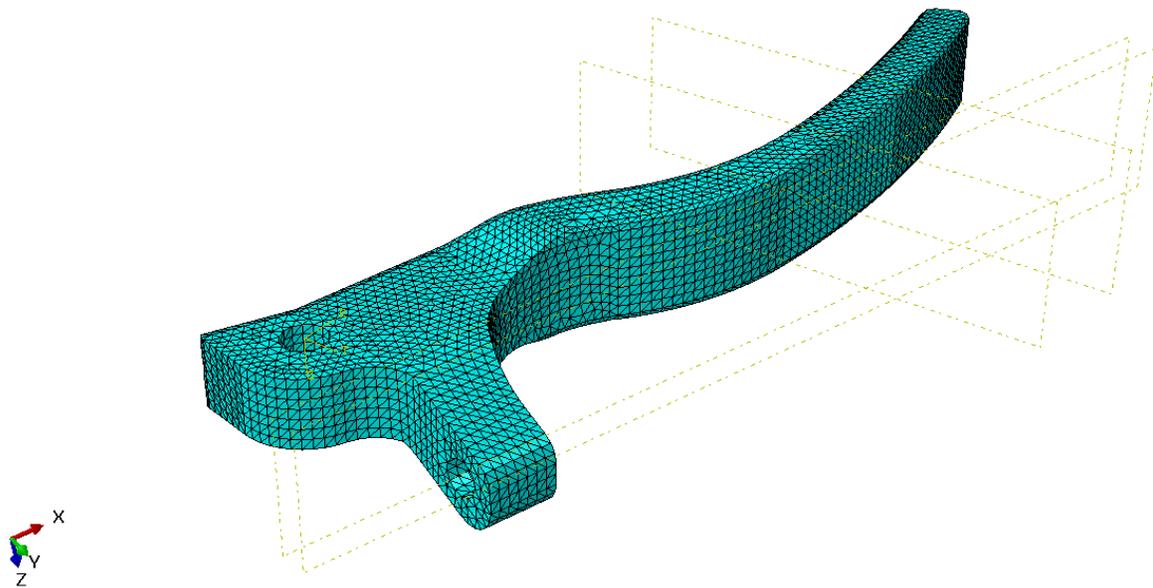
Los parámetros que modificaremos serán el tipo del elemento y la densidad de malla.

En cuanto a la forma del elemento utilizaremos elementos de tipo tetraédricos. Estos elementos se adaptan correctamente a la geometría de nuestro modelo. Además, comprobaremos que tipo de geometría se comporta mejor, lineal (C3D4) o cuadrática (C3D10).

Utilizaremos distintos valores de tamaño de malla que varían entre 1 y 5.

En la Figura 50 se muestra el mallado del modelo realizado con un tamaño de malla de 1 a modo de ejemplo.

En la Tabla 37 se recogen las distintas simulaciones con los distintos parámetros de control de malla elegidos.



**Figura 50.** *Mallado de la pieza*

Simulación	Tipo de elemento	Tamaño de malla	Número de elementos	Número de nodos
1	C3D4	5	3426	981
2	C3D4	3	7803	1886
3	C3D4	2	19333	4471
4	C3D4	1	120839	24137
5	C3D10	5	3426	6121
6	C3D10	3	7503	12305
7	C3D10	2	19333	30668
8	C3D10	1	120839	177180

**Tabla 37.** *Simulaciones*

### 5.1.5 Algoritmo de cálculo (Solver)

Es importante escoger correctamente el tipo de análisis. Abaqus permite elegir entre diferentes modelos de cálculo en función del tipo de análisis que deseemos realizar: estático, dinámico, cíclico, geoestático, termo-eléctrico, etc. En nuestro caso realizaremos un análisis del tipo estático lineal, ya que consideraremos que el modelo se encuentra en equilibrio bajo cargas estáticas.

La selección del tipo de análisis se realiza en el módulo Step. Crearemos un step nuevo y modificaremos el tamaño del incremento inicial. Este tamaño influirá en el número de interpolaciones que realizará el solucionador. En nuestro caso escogeremos un incremento inicial de 0,01.

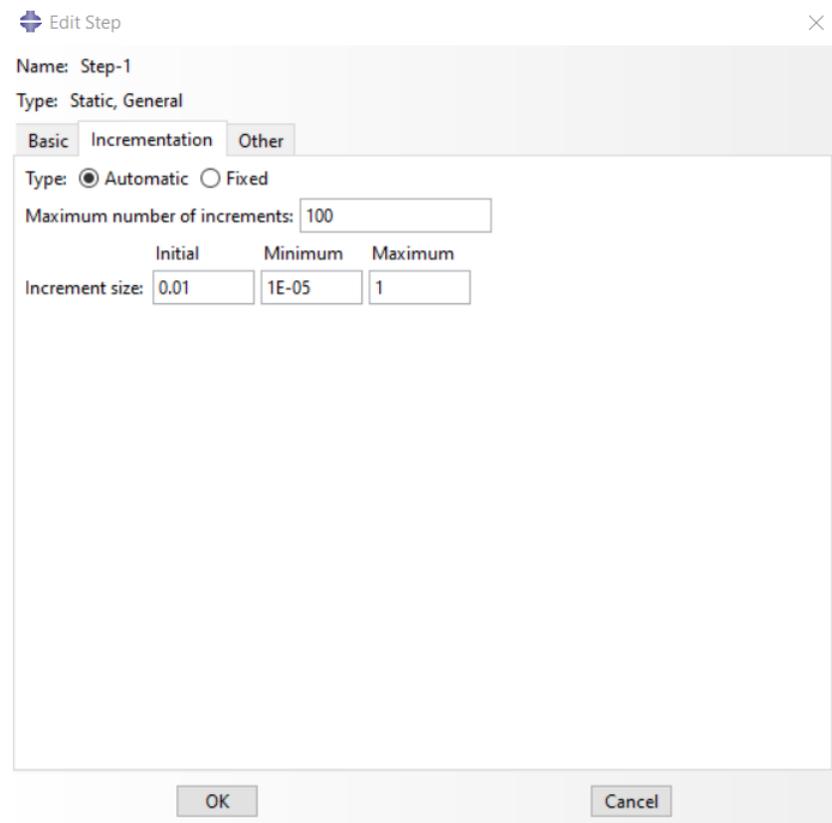


Figura 51. Módulo Step

## 5.2 Resultados simulación

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas mediante el método de los elementos finitos.

En primer lugar, se realizará una simulación para encontrar que sollicitación es la más desfavorable. Realizada esta comprobación, se procederá a realizar un análisis de malla empleando distintos elementos y densidades de malla. Por último, se realizarán los análisis y simulaciones del modelo con los tres materiales estudiados.

### 5.2.1 Sollicitación más desfavorable

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos de dos simulaciones realizadas sobre el material CFRP con un contenido de fibras de un 60%, aplicando la carga sobre la superficie de un dedo o la de dos.

- Simulación con un dedo

Las simulaciones que se muestran a continuación han sido realizadas con un tipo de elemento cuadrático y una densidad de malla de tamaño 2.

En la Figura 52 se muestran las tensiones máximas de Von Mises y en la Figura 53 se muestra el desplazamiento máximo medido en milímetros.

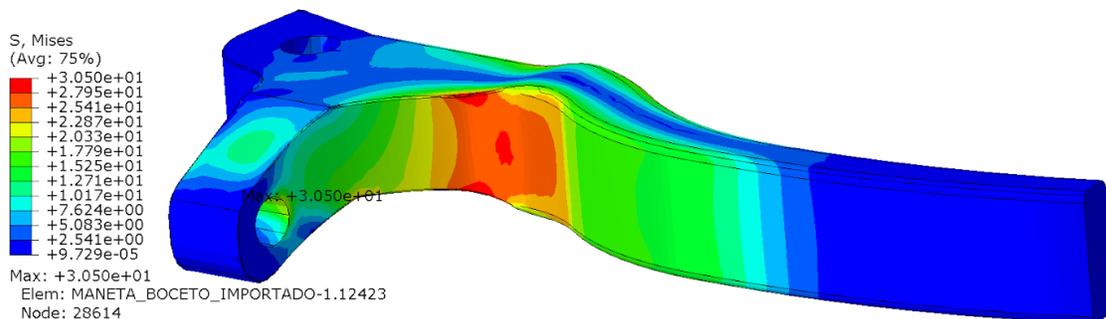


Figura 52. Tensiones máximas modelo con un dedo

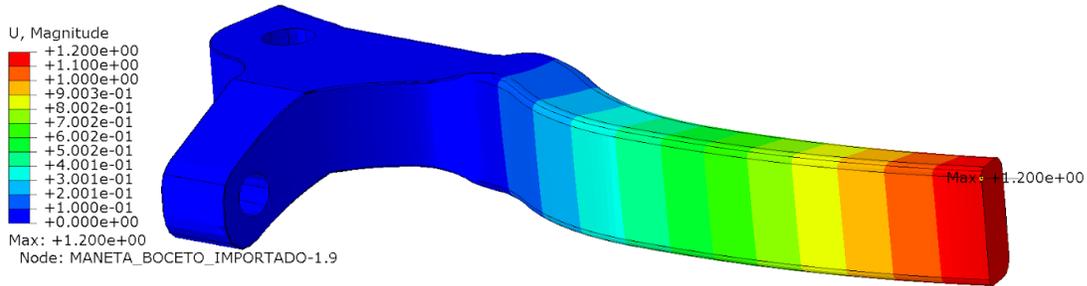


Figura 53. Desplazamiento máximo con un dedo

Observamos como las tensiones máximas se sitúan en la zona de compresión de la maneta y en la zona donde va colocado el empujador.

El desplazamiento máximo se sitúa en el extremo donde se aplica la presión.

- Simulación con dos dedos

A continuación, se muestran los resultados de la simulación realizada suponiendo que la presión es ejercida por dos dedos.

Al igual que en la simulación anterior se han empleado elementos del tipo cuadrático y una densidad de malla de tamaño 2.

En la Figura 54 se muestran las tensiones máximas de Von Mises en megapascales y en la Figura 55 se muestra el desplazamiento máximo medido en milímetros.

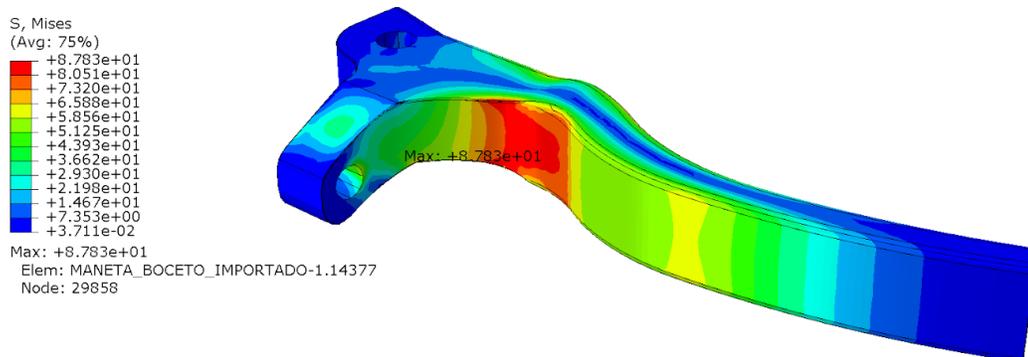
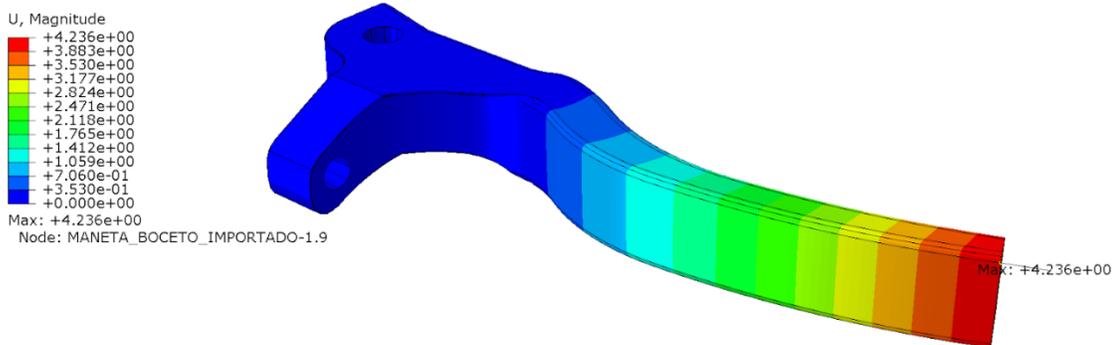


Figura 54. Tensiones máximas modelo con dos dedos



**Figura 55.** *Desplazamiento máximo modelo con dos dedos*

- Comparación de los resultados

En la Tabla 38 se muestran los resultados obtenidos de ambas simulaciones. Podemos ver como cuando se ejerce la presión con dos dedos aumenta considerablemente las tensiones y el desplazamiento. Esto se debe a que se genera un mayor momento al alejar la carga del punto de empotramiento.

Debido a esto, emplearemos la sollicitación de dos dedos para las siguientes simulaciones.

Simulación	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
1 dedo	30,5	1,2
2 dedos	87,83	4,236

**Tabla 38.** *Resultados simulación*

### 5.2.2 Análisis de sensibilidad de malla

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de malla se muestran a continuación.

Para la realización, se han empleado los elementos y densidades de malla mostrados en el apartado 4.1.4.

- CFRP\_60\_L\_5\_2D

Tipo de elemento: C3D4

Tamaño densidad de malla: 5

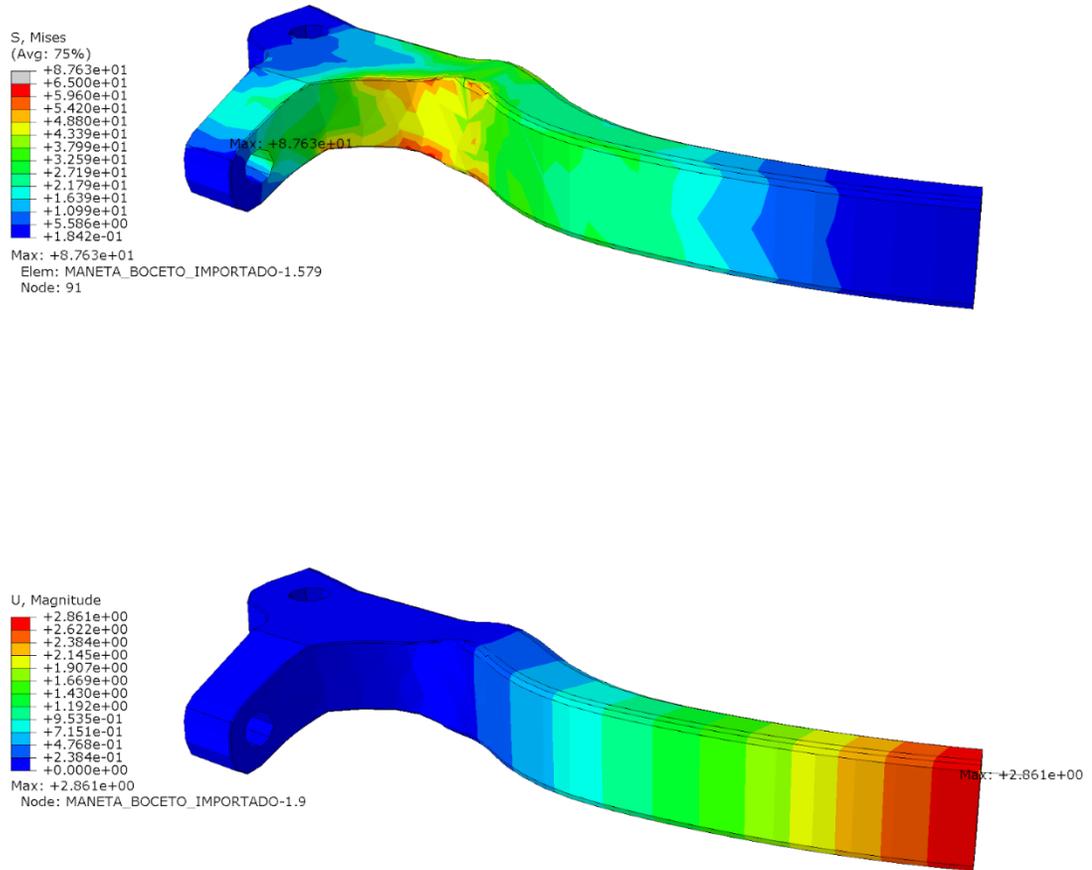


Figura 56. Simulación CFRP\_60\_L\_5\_2D

- CFRP\_60\_L\_3\_2D

Tipo de elemento: C3D4

Tamaño densidad de malla: 3

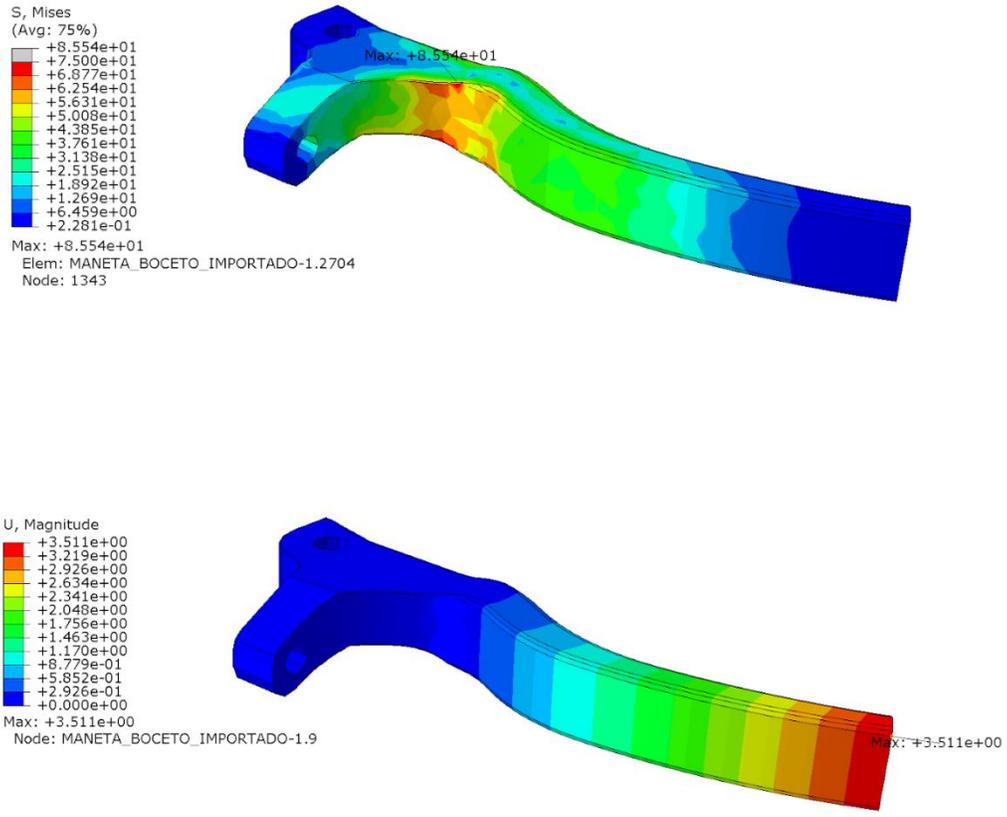


Figura 57. Simulación CFRP\_60\_L\_3\_2D

- CFRP\_60\_L\_2\_2D

Tipo de elemento: C3D4

Tamaño densidad de malla: 2

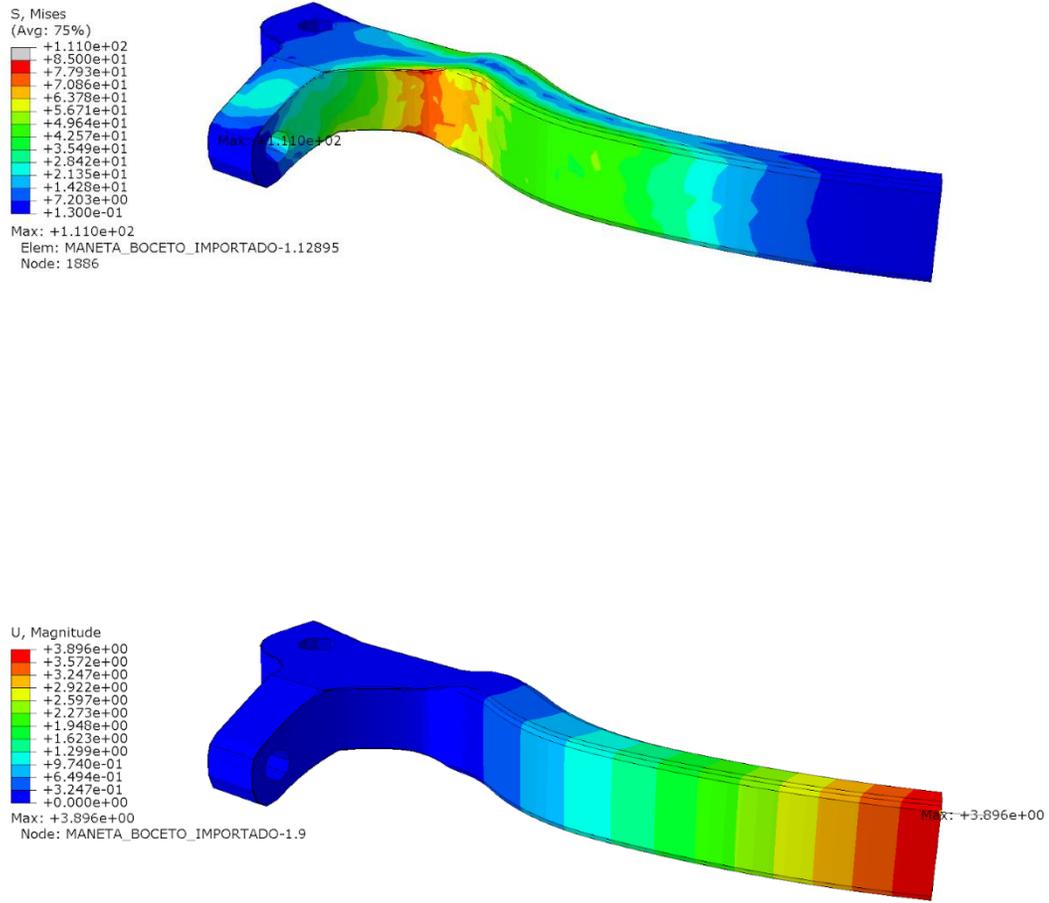


Figura 58. Simulación CFRP\_60\_L\_2\_2D

- CFRP\_60\_L\_1\_2D

Tipo de elemento: C3D4

Tamaño densidad de malla: 1

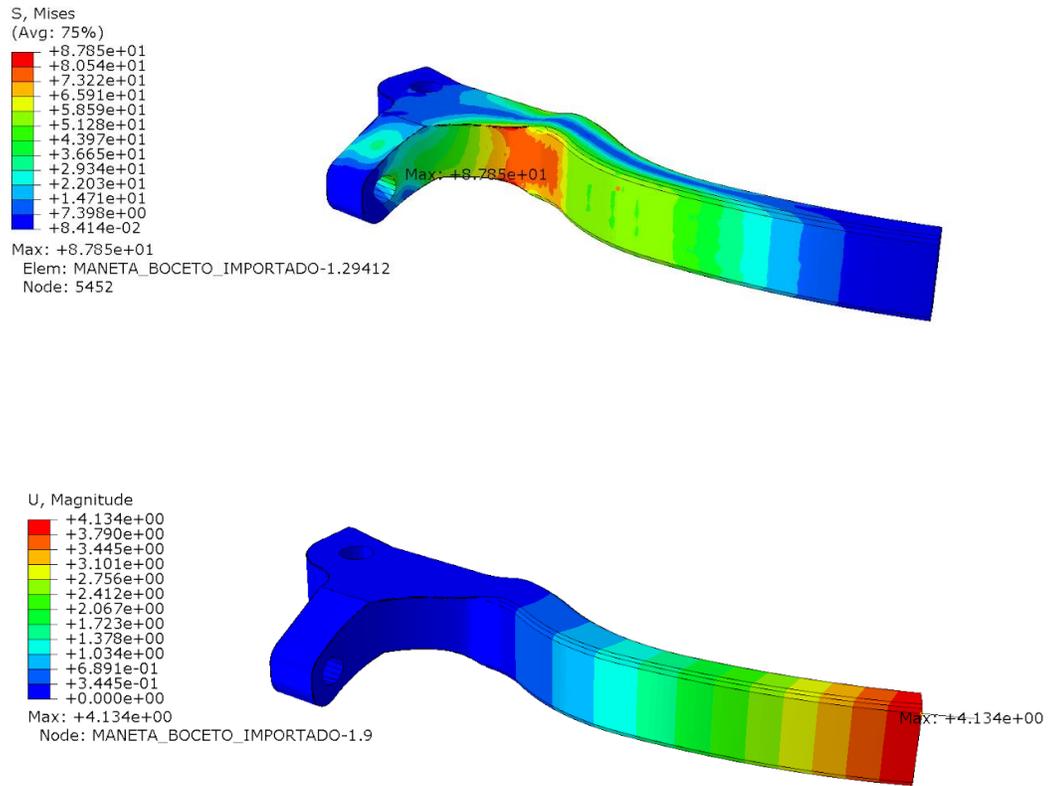


Figura 59. Simulación CFRP\_60\_L\_1\_2D

- CFRP\_60\_C\_5\_2D

Tipo de elemento: C3D10

Tamaño densidad de malla: 5

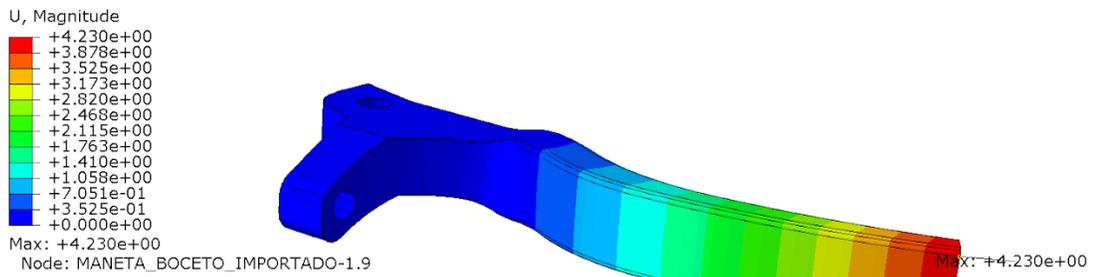
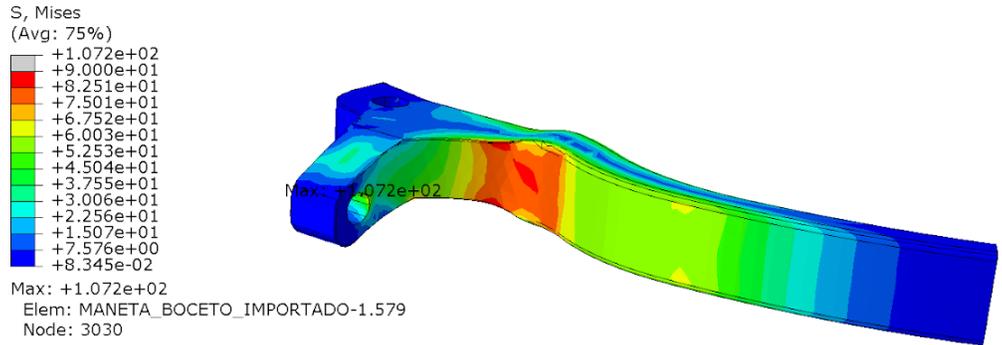


Figura 60. Simulación CFRP\_60\_C\_5\_2D

- CFRP\_60\_C\_3\_2D

Tipo de elemento: C3D10

Tamaño densidad de malla: 3

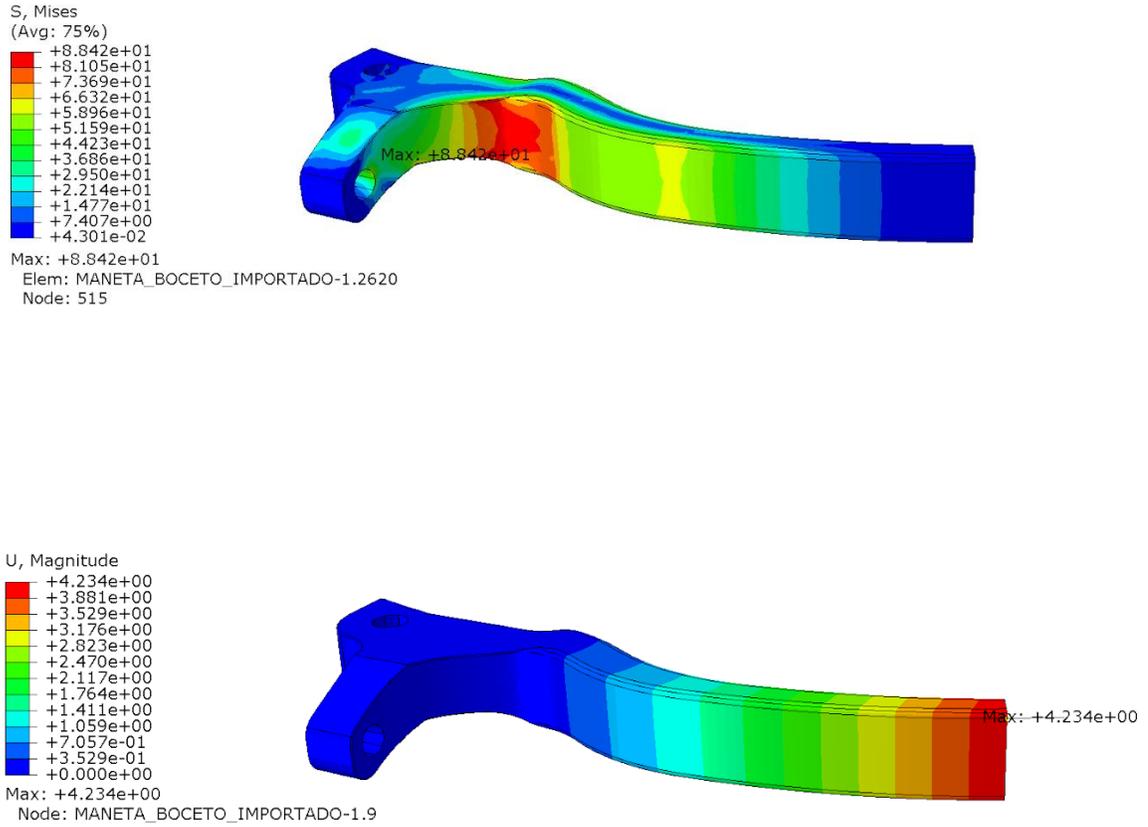


Figura 61. Simulación CFRP\_60\_C\_3\_2D

- CFRP\_60\_C\_2\_2D

Tipo de elemento: C3D10

Tamaño densidad de malla: 2

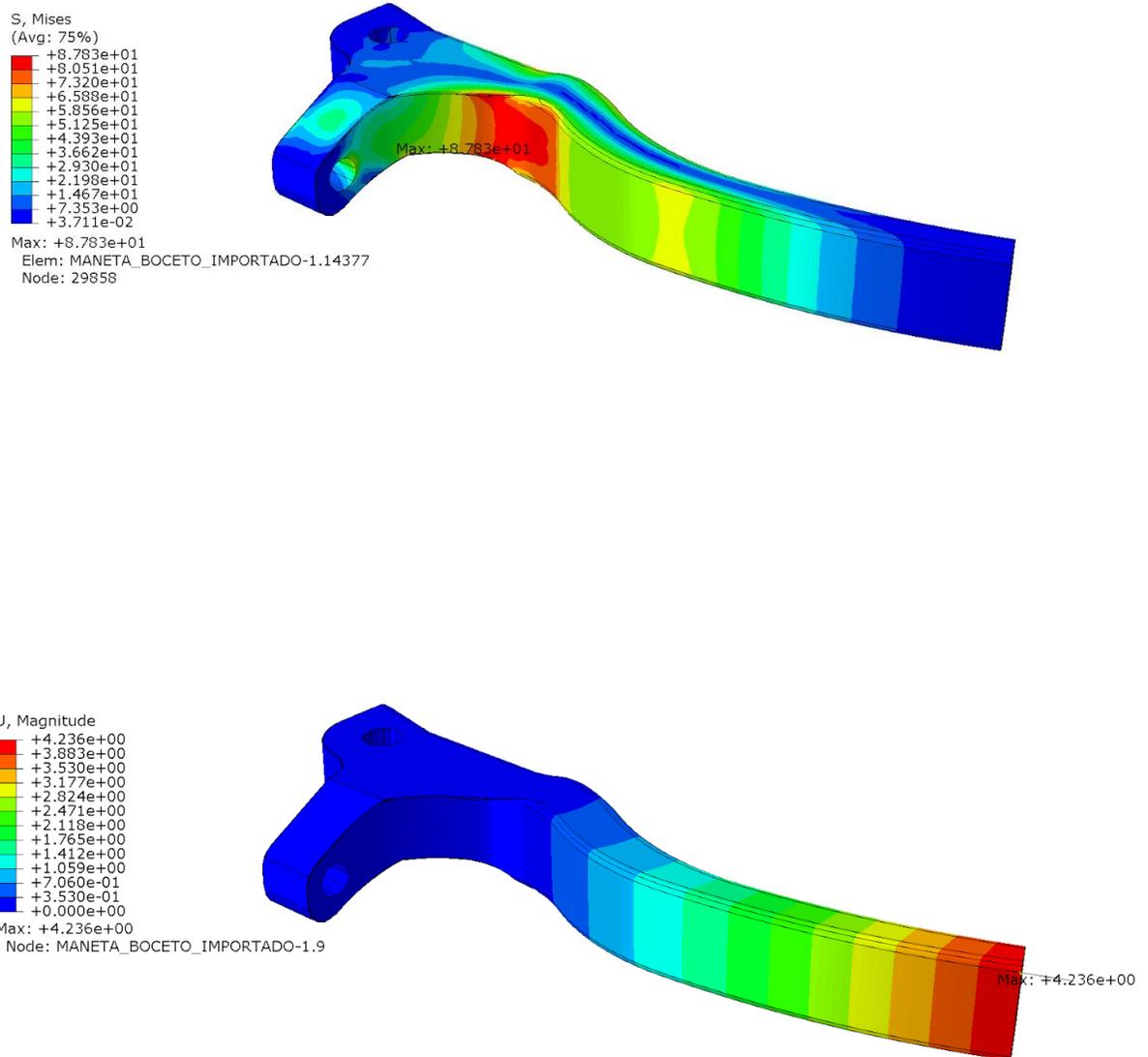


Figura 62. Simulación CFRP\_60\_C\_2\_2D

- CFRP\_60\_C\_1\_2D  
Tipo de elemento: C3D10  
Tamaño densidad de malla: 1

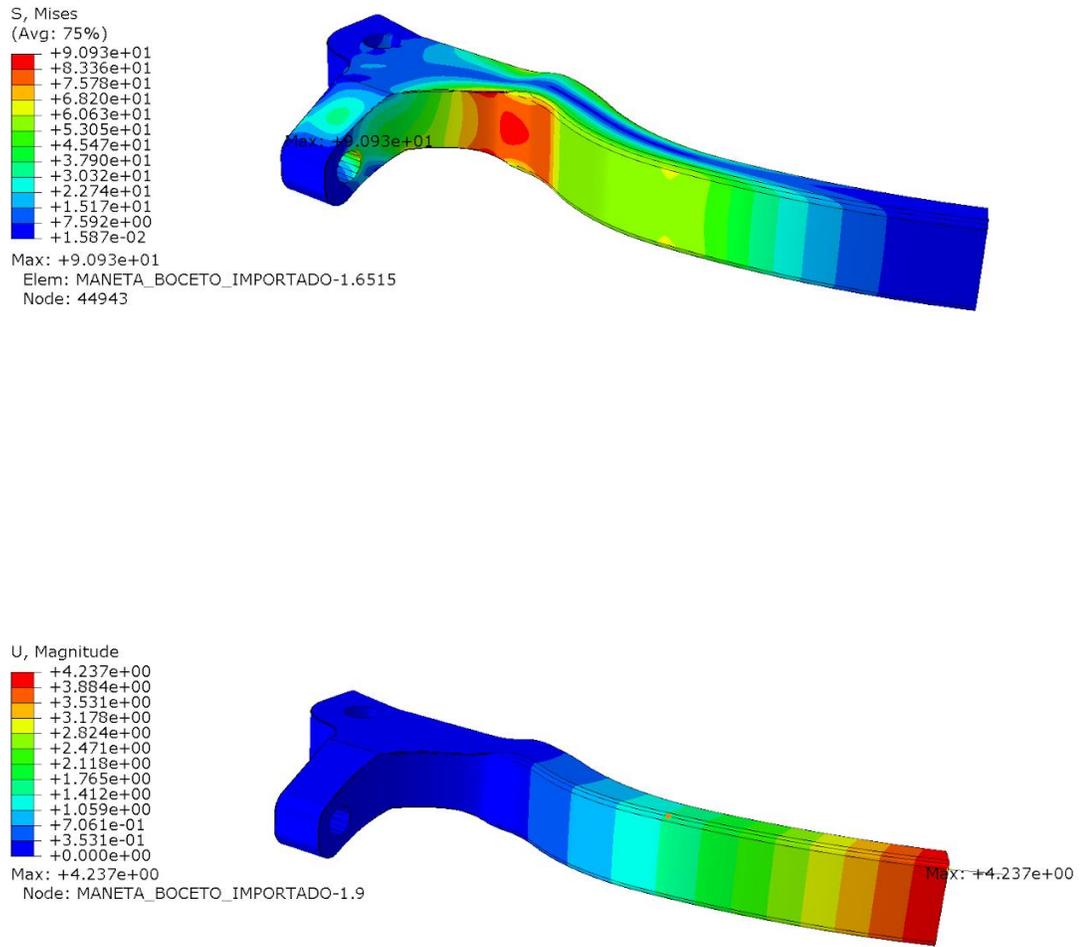


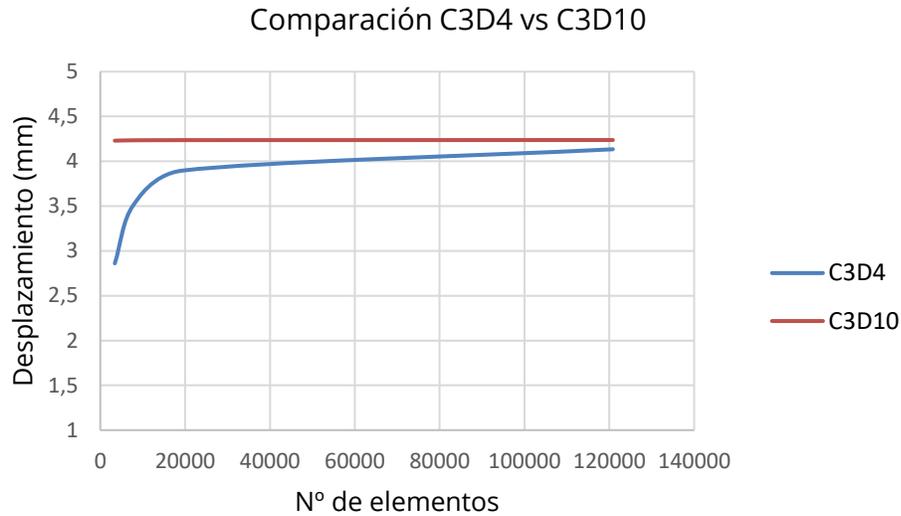
Figura 63. Simulación CFRP\_60\_C\_1\_2D

Los resultados obtenidos de las simulaciones mostradas en las páginas anteriores se recogen en laTabla 39.

Simulación	Tipo de elemento	N.º Elementos	N.º nodos	Tensión MAX (MPa)	Desplazamiento MAX (mm)
CFRP_60_L_5_2D	C3D4	3426	981	87,63	2,86
CFRP_60_L_3_2D	C3D4	7803	1886	85,54	3,51
CFRP_60_L_2_2D	C3D4	19333	4471	111	3,89
CFRP_60_L_1_2D	C3D4	120839	24137	87,85	4,13
CFRP_60_C_5_2D	C3D10	3426	6121	107,2	4,23
CFRP_60_C_3_2D	C3D10	7503	12305	88,42	4,23
CFRP_60_C_2_2D	C3D10	19333	30668	87,83	4,23
CFRP_60_C_1_2D	C3D10	120839	177180	90,93	4,23

**Tabla 39.** *Resultados simulaciones*

Para observar de manera más clara si los resultados del análisis de malla convergen, se han representado estos resultados en la Gráfica 11 mostrada a continuación.



**Gráfica 11.** *Análisis sensibilidad de malla (Desplazamientos)*

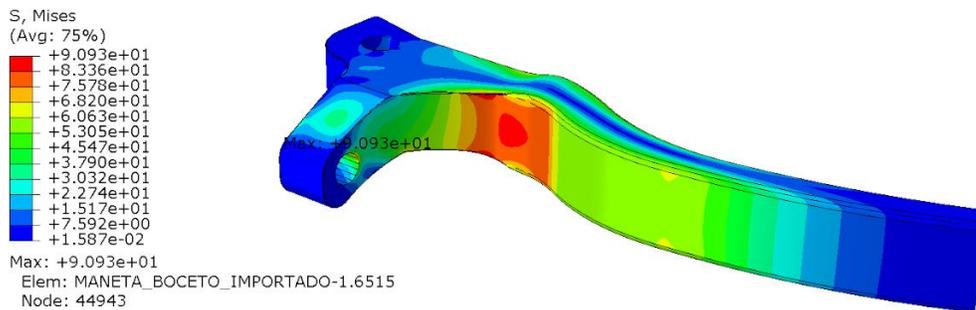
Si comparamos los resultados obtenidos de las simulaciones, podemos observar como las simulaciones con elementos de tipo lineal tienden a rigidizar más el modelo y se obtienen desplazamientos menores. Además, con este tipo de elemento se muestra mayor variabilidad de resultados en función del número de elementos empleados.

En las simulaciones realizadas con elementos de tipo cuadrático, se puede apreciar como los resultados experimentan menor variación a medida que se aumenta el número de elementos. Esto permitirá realizar simulaciones empleando menos recursos computacionales y obtener simulaciones más rápidas.

Realizadas estas consideraciones, como conclusiones del análisis de sensibilidad de malla, podemos decir que las simulaciones realizadas con elementos del tipo cuadrático convergen de mejor manera que las de tipo lineal y por ello utilizaremos este tipo de elemento para el resto de las simulaciones.

### 5.2.3 Simulación CFRP (Vf=60%)

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo fabricado en fibra de carbono con un volumen de fibras del 60%.



**Figura 64.** Simulación CFRP 60. Tensiones

En la Figura 64, podemos observar que la región más solicitada es la zona donde la maneta flexa y sus fibras están trabajado bajo compresión. Esta zona coincide con un cambio de sección, que como es de esperar en ese punto se producirá una concentración de tensiones, provocando que la maneta falle por esa zona.

Observamos que también se produce una concentración de tensiones en la zona donde va colocado el empujador. Sin embargo, estas tensiones son de un valor considerablemente pequeño por lo que no se debería producir la rotura por esa zona.

Si observamos el lado contrario de la maneta, mostrado en la Figura 65 , podemos ver que se producen tensiones importantes en la zona media de la maneta. En este caso esas tensiones son de tracción y se sitúan en la zona donde la maneta es más estrecha.

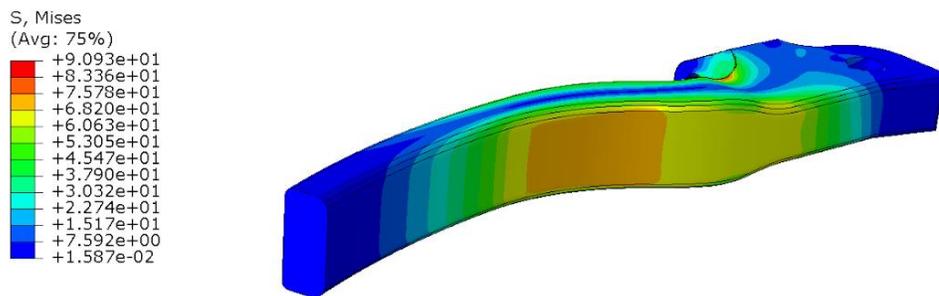


Figura 65. Simulación CFRP 60. Tensiones

En cuanto al desplazamiento máximo, podemos observar en la Figura 66, que se produce en el extremo de la maneta que está libre. Es un desplazamiento relativamente grande para el tamaño del modelo.

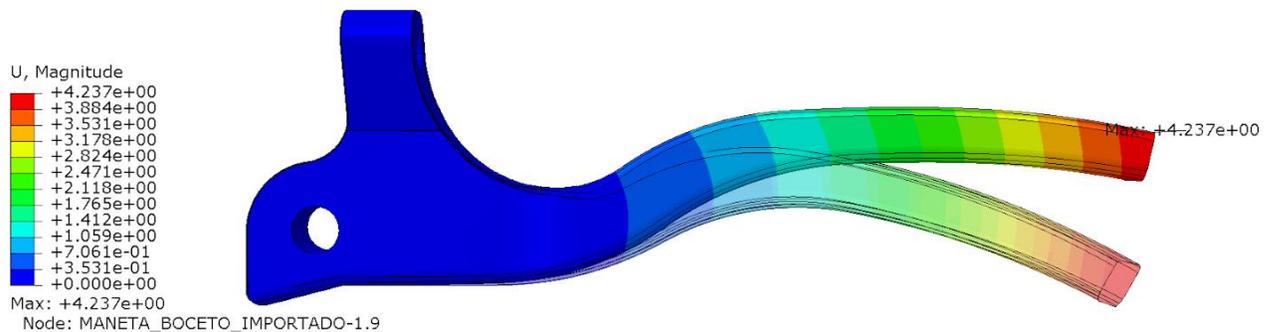


Figura 66. Simulación CFRP 60. Desplazamiento

## 5.2.4 Simulación CFRP (Vf=40%)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la simulación realizada con el modelo fabricado en fibra de carbono con un contenido de fibras del 40%.

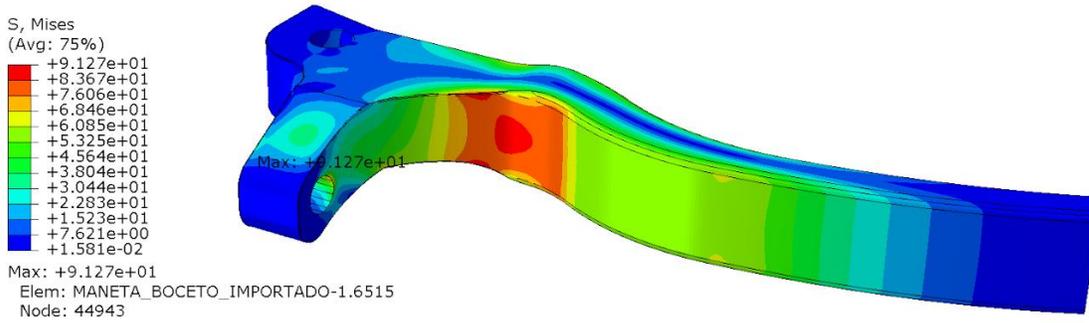


Figura 67. Simulación CFRP 40. Tensiones

Observamos en la, Figura 67 como las tensiones máximas que soporta el modelo se sitúan en la misma zona que en la simulación anterior. Esto es debido a como lo comentamos anteriormente, el cambio de sección que produce una concentración de tensiones.

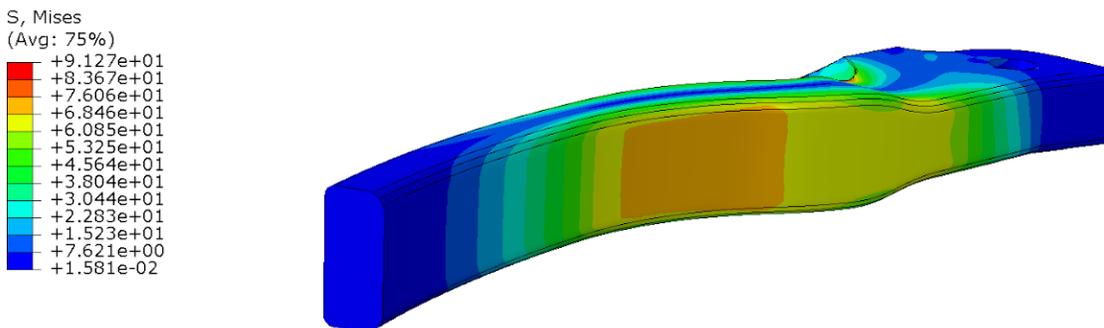
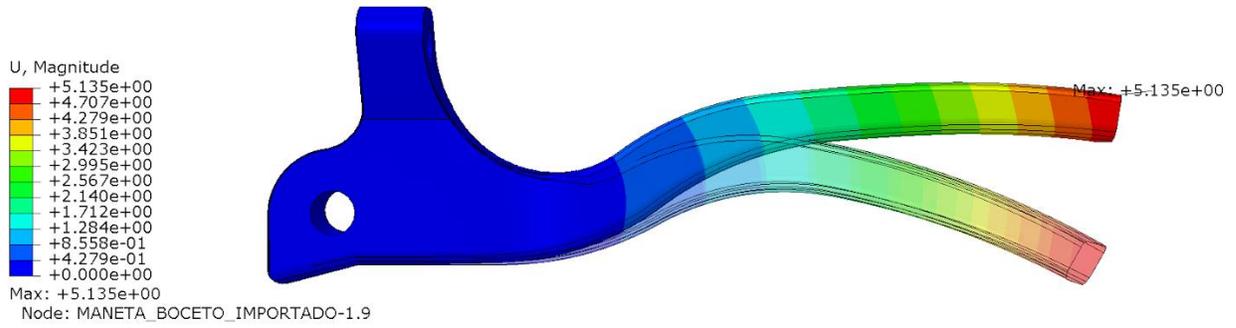


Figura 68. Simulación CFRP 40. Tensiones

El desplazamiento máximo también se sitúa en la zona libre del modelo como se puede observar en la Figura 71.



**Figura 69.** Simulación CFRP 40. Desplazamiento

### 5.2.5 Comparación CFRP 60 y CFRP 40

Como se puede observar en la Tabla 40, los resultados obtenidos de ambas simulaciones son similares.

Podemos observar que las tensiones máximas se sitúan en la misma zona. Esto confiere certeza a la hora de saber si la simulación se ha realizado correctamente. Además, nos indica que con ambos materiales, el modelo comenzará a romper por la zona en la que se produce el cambio de sección.

El desplazamiento máximo que experimenta el modelo es más acentuado en el material con menos cantidad de fibras. Esto se debe a que el material CFRP 40 es menos rígido que el CFRP 60 como observamos anteriormente en los ensayos de tracción.

Material	Tensión máxima (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)
CFRP 40	89,4	5,13
CFRP 60	88,03	4,23

**Tabla 40.** *Resultados simulaciones*

## 5.2.6 Simulación de la maneta fabricada en aluminio

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la simulación del modelo fabricado en aluminio. En este caso hemos aplicado un comportamiento elastoplástico debido al comportamiento dúctil que tiene el aluminio.

Los resultados de las tensiones máximas de Von Mises se muestran en la Figura 70.

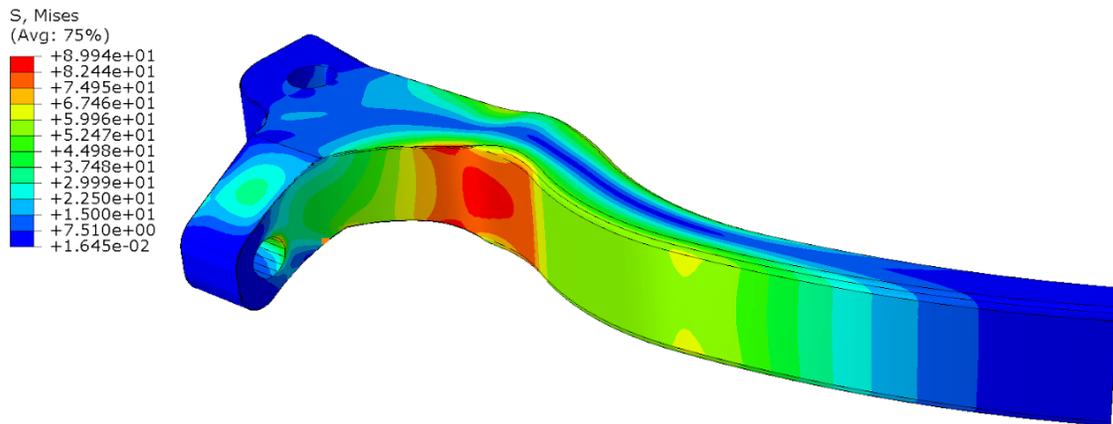


Figura 70. Simulación Aluminio. Tensiones

Observamos como las tensiones máximas se obtienen misma zona que en las simulaciones anteriores, por lo que podemos asegurar que la simulación es correcta.

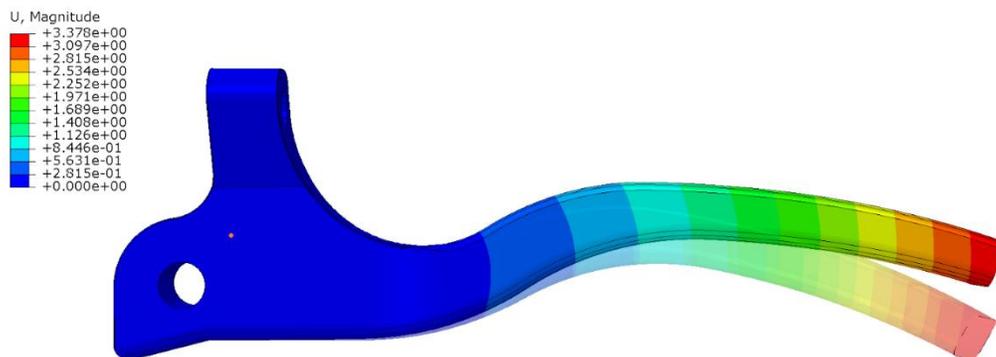


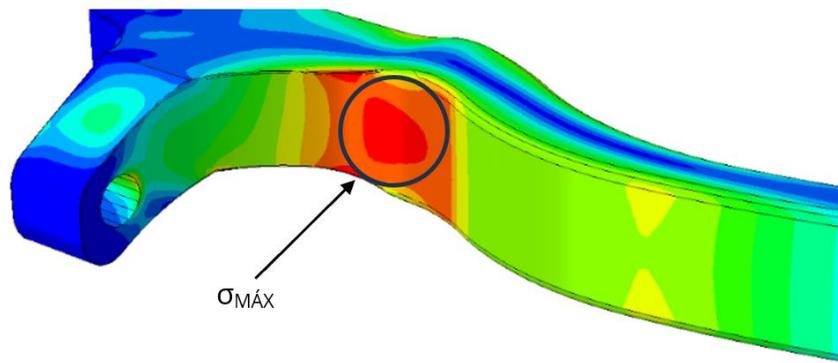
Figura 71. Simulación Aluminio. Desplazamiento

El desplazamiento máximo obtenido de la simulación se sitúa en el extremo libre como se muestra en la Figura 71. Para poder observar con mayor facilidad ese desplazamiento se ha realizado un ajuste de la escala de deformación del visualizador de Abaqus.

### 5.2.7 Comparación CFRP ( $V_f=60\%$ ) y Aluminio

Los datos obtenidos de las simulaciones realizadas con los modelos de fibra de carbono con un 60% de fibras y de aluminio se muestran en la Tabla 41.

Para realizar una comparación lo más real posible, se han tomado las tensiones que aparecen en la zona en la que la maneta está sometida al esfuerzo de compresión (Figura 72). Esto es así debido a que en algunas simulaciones existe un valor de tensiones máximas un poco superior en determinadas zonas en las que la malla no se adapta de manera correcta a la geometría y provoca un error de cálculo.



**Figura 72.** Zona tensión máxima

Material	Tensión máxima (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)
CFRP 60	88,03	4,24
Aluminio	87,54	3,37

**Tabla 41.** Resultados simulaciones

De los datos de la tabla observamos como el aluminio al tener un módulo de elasticidad superior al de la fibra de carbono, es decir al ser más rígido, se obtienen desplazamientos

mucho menores. Las tensiones máximas son muy similares, sin embargo, el aluminio al tener un comportamiento dúctil, se encuentra cerca del punto de fluencia.

## 6 PRESUPUESTO ECONÓMICO

En este capítulo se muestra el presupuesto aproximado que ha sido necesario para llevar a cabo este trabajo fin de grado sobre materiales compuestos. El presupuesto se desglosa por un lado en el coste del material necesario para la fabricación de las probetas de fibra de carbono y de aluminio, y por otro lado el coste de la mano de obra. También se incluye el coste debido al uso de los equipos de medición utilizados para realizar los ensayos, así como el coste del alquiler de las licencias del software de simulación.

### 6.1 Capítulo I. Materiales

Capitulo I. Materiales			
Descripción	Unidades	Precio unitario (€/Ud.)	Precio Total (€)
Fibra Cortada para Efecto Forjado 12mm 150gr	1	19,95	19,95
Resina Epoxi para laminación profesional 105 1kg	1	23,95	23,95
Plancha Aluminio AW-5005 500x300x1,5	1	22,32	22,32
PLA i3D Tested Rojo 1.75 mm	1	15,55	15,55
<b>TOTAL</b>			<b>81,77</b>

### 6.2 Capítulo II. Equipamiento

Capitulo II. Equipo electrónico			
Descripción	Unidades	Precio unitario (€/Ud.)	Precio Total (€)
Alquiler Máquina de tracción Servosis	3 h	20	60
Licencia Abaqus	1	1000	1000
Balanza de precisión	1	40	40
Impresora 3D	1	350	350
<b>TOTAL</b>			<b>1450</b>

### 6.3 Capítulo III. Mano de obra

Capítulo III. Mano de obra			
Mano de obra ingeniero	Horas	Precio unitario (€/h.)	Precio Total (€)
Estudio personal e investigación	15	25	375
Diseño de piezas	10	25	250
Fabricación de probetas	30	25	750
Realización de ensayos	9	25	225
Realización de simulaciones	40	25	1000
Análisis de resultados y redacción	70	25	1750
<b>TOTAL</b>			<b>4350</b>

### 6.4 Capítulo IV. Resumen

Resumen	
Capítulo I. Materiales	81,77 €
Capítulo II. Equipo electrónico	1450 €
Capítulo III. Mano de obra	4350 €
	5881,77 €
13,00 % Gastos Generales	764,63 €
6,00 % Beneficio industrial	352,91 €
	6999,31 €
21,00 % IVA	1469,86 €
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>	<b>8469,17 €</b>

El presupuesto total del proyecto asciende a un total de **OCHO MIL CUATROCIENTOS SESENTA Y NUEVE EUROS con DIECISIETE CÉNTIMOS.**

## 7 CONCLUSIONES

La finalidad de este Trabajo Fin de Grado ha sido estudiar el comportamiento de los materiales compuestos reforzados con fibras cortas de carbono y epoxi para el caso concreto de la maneta de freno de una motocicleta, y comparar los resultados con alguno de los materiales más usados en la industria como es el aluminio.

Las conclusiones más relevantes que se pueden obtener del estudio realizado son las siguientes:

- El método de fabricación empleado permite fabricar piezas con geometrías y formas complicadas, que difícilmente se podrían obtener con otros materiales de una manera precisa y asequible.
- Se ha observado como la cantidad de fibra empleada en el material compuesto afecta directamente a las propiedades mecánicas del mismo, aumentando su resistencia y rigidez.
- Los ensayos de tracción muestran que el material compuesto estudiado es menos rígido que el aluminio. Sin embargo, su resistencia es muy superior para igualdad de peso, por lo que podría ser una interesante alternativa para determinadas piezas fabricadas normalmente en aluminio.
- El comportamiento frente a impacto del material compuesto ha demostrado que se trata de un material frágil, capaz de absorber menos energía que el aluminio que tiene un comportamiento dúctil y es capaz de deformarse plásticamente antes de la rotura.
- Las simulaciones por elementos finitos de la maneta de freno permiten determinar las zonas que soportan mayores estados tensionales y reforzarla allí donde sea necesario. Además, ofrecen una valiosa información sobre el comportamiento que va a experimentar un modelo sin necesidad de fabricarlo y ensayarlo, lo que reduce en gran medida los costes y facilita la optimización del diseño.

## 8 TRABAJO FUTURO

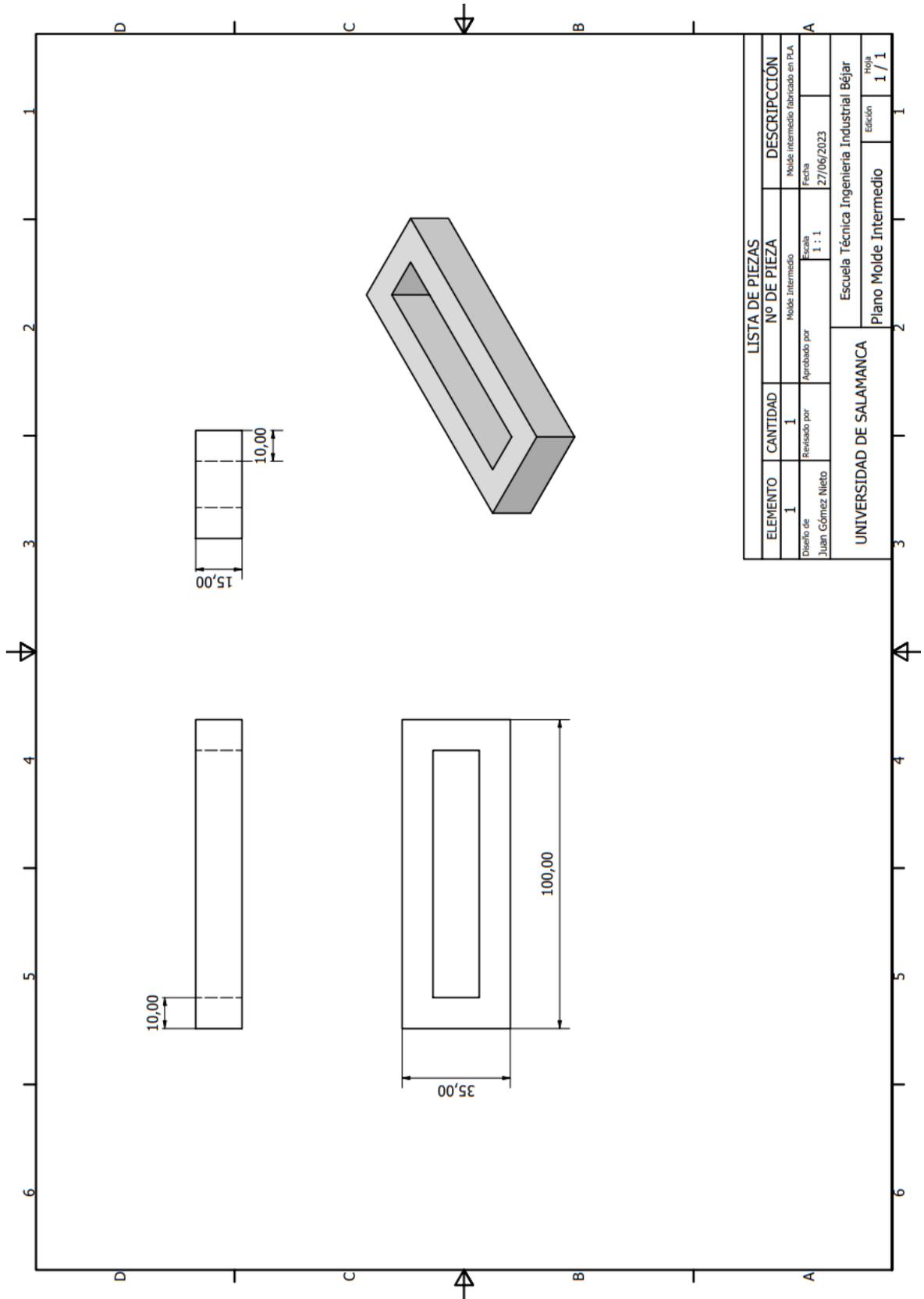
Cualquier trabajo de investigación resuelve dudas e incógnitas que se tenían en un principio, pero a medida que se profundiza en el estudio, comienzan a surgir nuevas preguntas. En este apartado se presentan algunas líneas de trabajo que completarán este proyecto sobre el comportamiento de los materiales compuestos.

Un aspecto interesante sería poder realizar los ensayos de tracción empleando algún tipo de extensómetro o galgas extensiométricas, con la finalidad de obtener de manera más precisa la deformación que experimentan las probetas, y comparar los resultados con los obtenidos en este trabajo.

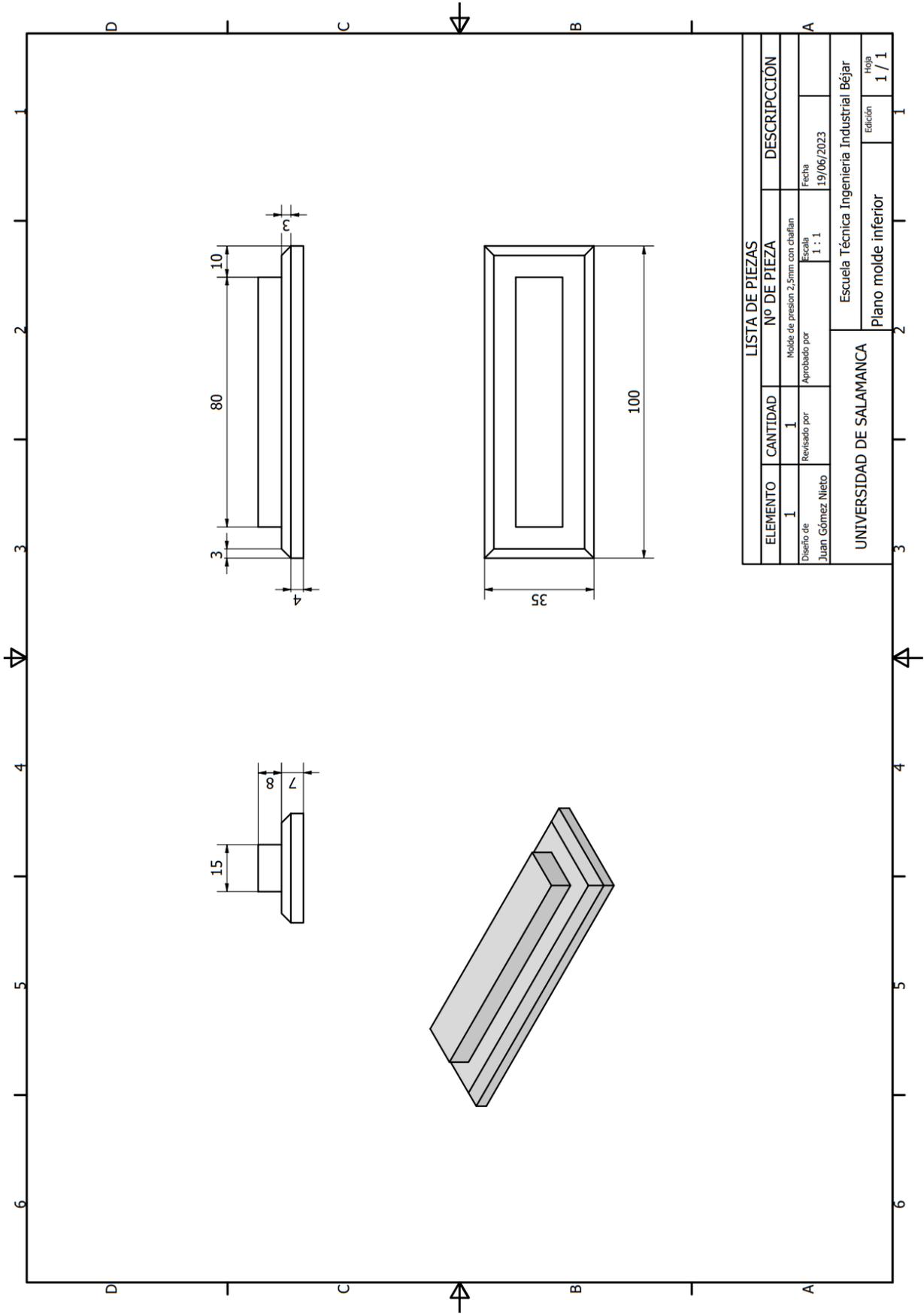
Otro aspecto interesante sería realizar diferentes ensayos con probetas fabricadas con distintos tamaños de fibras y ver cómo se comporta el material en función de la longitud de las fibras cortas. También se podría estudiar el efecto que tendrían distintos tipos de resina.

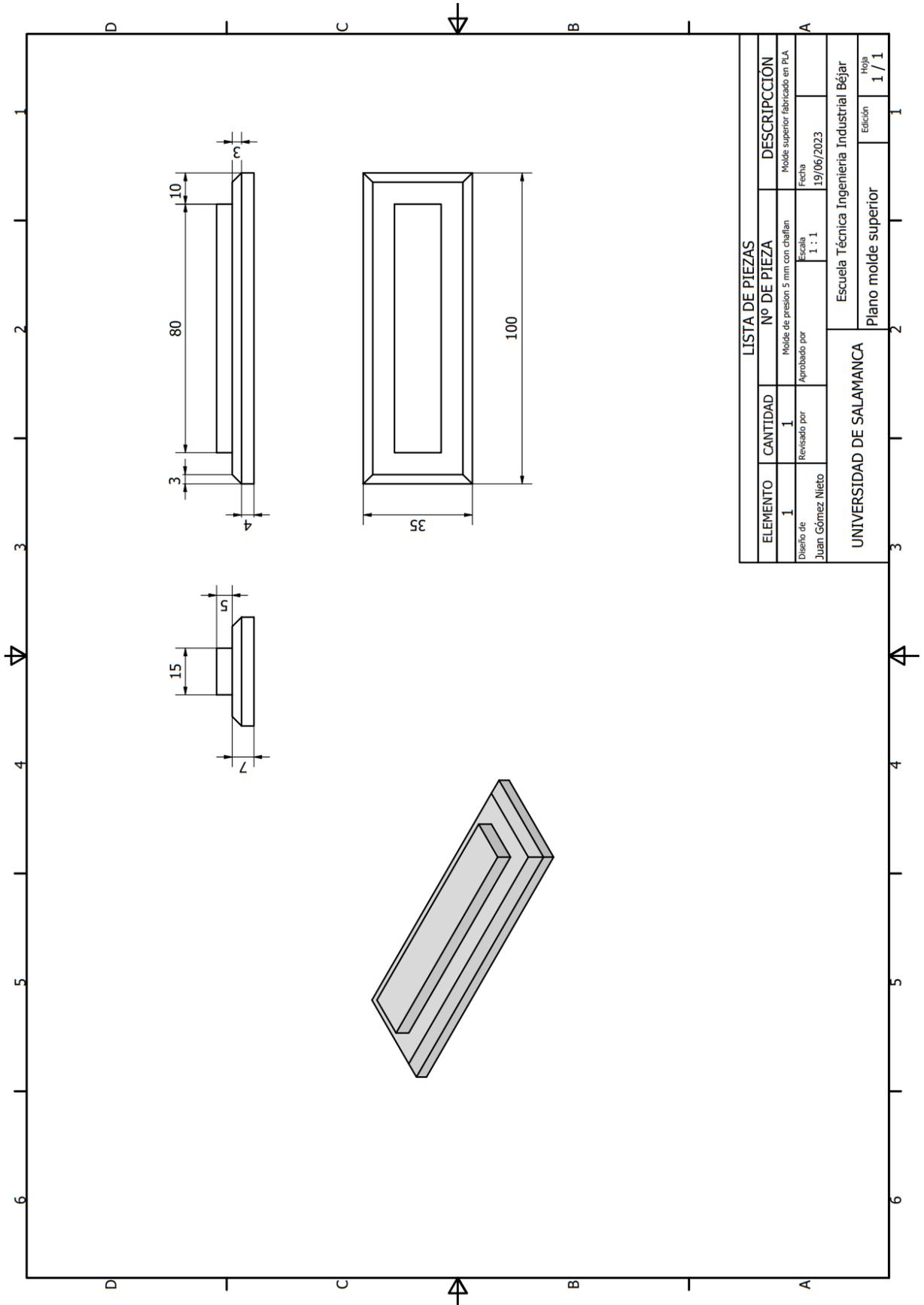
En referencia a la simulación, sería interesante modelizar este tipo de material a través de la micromecánica.

APÉNDICE A

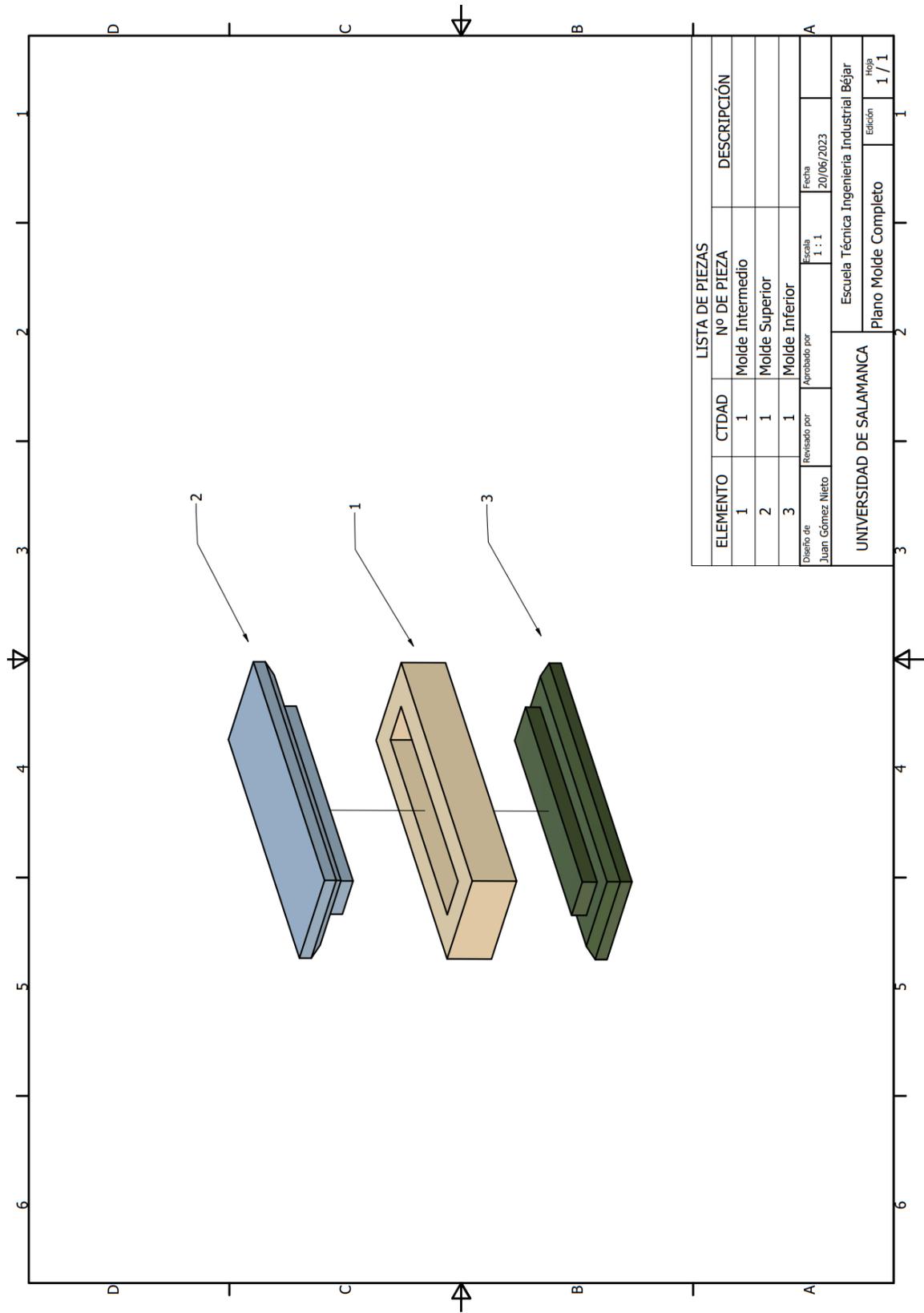


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CANTIDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Molde Intermedio	Molde Intermedio fabricado en PLA
Revisado por		Aprobado por	Fecha
Juan Gómez Nieto		Juan Gómez Nieto	27/06/2023
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA			Escuela Técnica Ingeniería Industrial Béjar
Plano Molde Intermedio			Hoja Edición 1 / 1

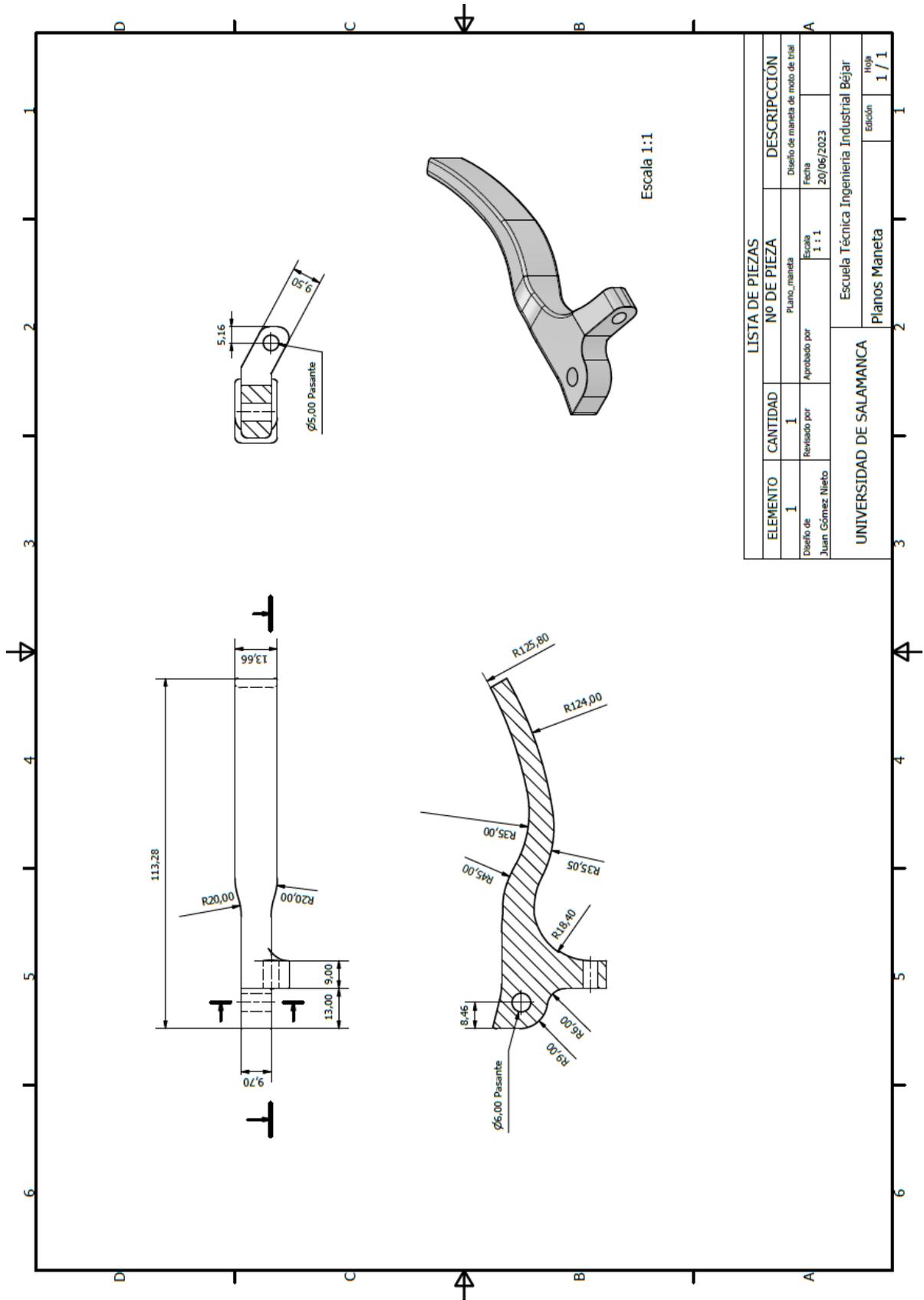




LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CANTIDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Molde de presión 5 mm con chaffan	Molde superior fabricado en PLA
Diseño de Juan Gómez Nieto		Aprobado por	Fecha
		Revisado por	19/06/2023
		Escala	1 : 1
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA			Escuela Técnica Ingeniería Industrial Béjar
Plano molde superior			Edición
			Hoja
			1 / 1



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Molde Intermedio	
2	1	Molde Superior	
3	1	Molde Inferior	
Diseño de Juan Gómez Nieto		Aprobado por	Fecha 20/06/2023
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA		Escala 1 : 1	
		Escuela Técnica Ingeniería Industrial Béjar	
		Plano Molde Completo	Hoja Edición 1 / 1



## BIBLIOGRAFÍA

(s.f.).

Barbero Pozuelo, E., García Castillo, S., & Sánchez Saéz, S. (2010). Introducción a los materiales compuestos. *Meánica de Materiales Compuestos*. Madrid: Universidad Carlos III.

Bird, M. (10 de Agosto de 2021). *Creatup*. Obtenido de [https://creatup.net/fabricacion-materiales-compuestos/#Procesos\\_en\\_molde\\_abierto](https://creatup.net/fabricacion-materiales-compuestos/#Procesos_en_molde_abierto)

*Easy Composites*. (s.f.). Obtenido de <https://www.easycomposites.eu/>

Escudero López, D. (2001). Materiales Compuestos. Aplicaciones. *Informes de la Construcción*, 8.

J.I.Apiñaniz, S. R. (2021). A quasi-monoenergetic short time duration compact proton source for probing high energy density states of matter. *Scientific reports*, 11.

Joel A, C., & Jim R, P. (2011). Maximum isometric finger pull forces. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 91-95.

Krishan K, C. (2012). *Composites Materials. Science and Engineering*. New York: Springer Nature Switzerland AG.

May, C., & Schalack, P. (11 de Mayo de 2018). *Wikipedia*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Resina\\_epoxi](https://es.wikipedia.org/wiki/Resina_epoxi)

Miravete, A., & Castejón, L. (2007). *Materiales Compuestos*. Barcelona: Editorial Reverte, S.A.

Peralta, Á. (2014). *Desayuno con fotones*. Obtenido de <https://desayunoconfotones.org/2014/09/11/aceleracion-de-particulas-cargadas-por-laser-presente-futuro-y-aplicaciones/>

Rodríguez Galbarro, H. (2015). *Ingemecanica.com*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>

Wikipedia. (s.f.). Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Emisi%C3%B3n\\_espont%C3%A1nea](https://es.wikipedia.org/wiki/Emisi%C3%B3n_espont%C3%A1nea)

