

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales
Mención en Materiales

Puesta a punto y caracterización de probetas de material compuesto fabricadas con un sistema de impresión 3D

Autor: Manuel Mudarra Acebedo

Tutores: Jesus Justo Estebaranz

Luis Arístides Távara Mendoza

Dpto. de Mecánica de Médios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Puesta a punto y caracterización de probetas de material compuesto fabricadas con un sistema de impresión 3D

Autor:

Manuel Mudarra Acebedo

Tutores:

Jesús Justo Estebanz

Luis Arístides Távara Mendoza

Dpto. de Mecánica de Médios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Proyecto Fin de Carrera: Puesta a punto y caracterización de probetas de material compuesto fabricadas con un sistema de impresión 3D

Autor: Manuel Mudarra Acebedo

Tutores: Jesús Justo Estebaranz
Luis Arístides Távora Mendoza

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mis padres, por haber hecho posible que llegara hasta aquí. Gracias por haberme apoyado en todas las etapas de mi vida y estar dispuestos a dar todo por mí.

A mi hermano, por acompañarme durante toda mi vida y ser un amigo con el que siempre podré contar.

A mis tutores, Jesús Justo y Luis Távara, por depositar vuestra confianza en mí y a estar dispuestos a ayudarme en cualquier momento.

A mis amigos, por haber hecho que todos aquellos días en la biblioteca mereciesen la pena.

A Alejandra, por estar siempre a mi lado y ser el mejor regalo de la carrera.

A los integrantes del departamento de LERM, Pablo, Patri, Antonio, José Ramón y en especial a Teresa. Gracias por haberme ayudado y aconsejado en todo lo que he necesitado, siempre con una sonrisa y haciéndome sentir como en casa.

Gracias a todos.

Manuel Mudarra Acebedo

Septiembre 2021

Resumen

Las ventajas que ofrecen actualmente los procesos de fabricación aditiva con materiales poliméricos son múltiples: una reducción del coste de fabricación, posibilidad de crear figuras complejas y un prototipado rápido, sin embargo, estos materiales suelen tener unas propiedades mecánicas deficientes. Para solucionar dicho problema pueden ser reforzados con fibras para crear materiales compuestos, mejorando así enormemente sus propiedades mecánicas y abriendo las puertas a numerosas aplicaciones. Este tipo de tecnología ya se comercializa por la empresa Markforged con su impresora de materiales compuestos de segunda generación Mark Two.

En este trabajo se indagará en las posibilidades que ofrece esta impresora con sus mejoras generacionales, caracterizar ciertas propiedades de los materiales y aplicar esta tecnología a un proyecto de investigación. En dicho proyecto se ha estudiado el efecto escala en los materiales compuestos fabricados con la impresora Mark Two.

Abstract

The advantages currently offered by additive manufacturing processes with polymeric materials are multiple: a reduction in manufacturing cost, the possibility of creating complex figures and rapid prototyping. However, these materials tend to have poor mechanical properties. To solve this problem, they can be reinforced with fibers to create composite materials, thus greatly improving their mechanical properties, and opening the doors to numerous applications. This type of technology has already been brought to market by the Markforged[®] company with its second-generation Mark Two[®] composite printer.

This work will investigate the possibilities offered by this printer with its generational improvements, to characterize certain properties of the materials that it uses and to apply this technology to a research project. In this project, the scale effect in composite materials manufactured with the Mark Two[®] printer has been studied.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xxi
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 <i>Objetivo del Trabajo Fin de Grado</i>	1
1.1 <i>Estructura del documento</i>	2
Capítulo 2: Fabricación aditiva	3
2.1 <i>Introducción</i>	3
2.2 <i>Ventajas e inconvenientes de la fabricación aditiva</i>	3
2.3 <i>Tipos de tecnologías de fabricación aditiva [2] [10]</i>	6
2.4 <i>Aplicaciones de la Fabricación Aditiva</i>	11
2.5 <i>Fabricación aditiva con materiales compuestos [14]</i>	13
Capítulo 3: Efecto Escala	11
3.1 <i>Importancia del efecto escala</i>	11
3.2 <i>Efecto escala en materiales compuestos de fibra continua [16]</i>	11
Capítulo 4: Impresora Mark Two®	15
4.1 <i>Funcionamiento de la impresora Mark Two®</i>	15
4.1.1 <i>Mejoras generacionales</i>	16
4.2 <i>Características técnicas de la Impresora</i>	17
4.3 <i>Materiales de impresión</i>	17
4.3.1 <i>Plástico que actúa como matriz.</i>	17
4.3.2 <i>Fibras de refuerzo.</i>	18
4.4 <i>Modelado e Impresión</i>	21
4.4.1 <i>Modelado 3D con CATIA</i>	21
4.4.2 <i>Impresión con Eiger</i>	22
4.4.3 <i>Estudio de impresiones</i>	32
4.5 <i>Costo Monetario y Mantenimiento</i>	36
Capítulo 5: Diseño y realización de ensayos	39
5.1 <i>Introducción</i>	39
5.2 <i>Diseño de las probetas</i>	39
5.2.1 <i>Diseño preliminar</i>	39
5.2.2 <i>Diseño 3D e implementación en Eiger</i>	40
5.3 <i>Fabricación de las probetas</i>	42
5.3.1 <i>Impresión de las probetas</i>	42
5.3.2 <i>Medición de las probetas</i>	47
5.3.3 <i>Corte y pegado de tacos</i>	49

<i>5.4 Ensayos de tracción</i>	53
5.4.1 Instrumentación y utillaje	54
5.4.2 Parámetros de ensayo	56
5.4.3 Modelo de ensayo	56
<i>5.5 Resultados</i>	58
5.5.1 Onyx	58
5.5.2 Probetas de fibra de carbono	59
5.5.3 Probetas de fibra de vidrio	67
5.5.4 Efecto escala	73
Capítulo 6: Recomendaciones y Fallos de Impresión	77
Capítulo 7: Conclusiones y Desarrollos futuros	81
<i>7.1 Conclusiones derivadas de la fabricación aditiva con la impresora Mark Two®</i>	81
<i>7.2 Conclusiones derivadas del estudio del efecto escala</i>	82
<i>7.3 Desarrollos futuros con la Impresora Mark Two®</i>	83
<i>7.4 Desarrollos futuros en el estudio del Efecto Escala</i>	83
Referencias	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las principales tecnologías de fabricación aditiva y sus características	10
Tabla 2. Principales características técnicas de la impresora Mark Two®	17
Tabla 3. Propiedades de los materiales descritos ofrecidas por Markforged®	20
Tabla 4. Espesor de las capas según el tipo de refuerzo	26
Tabla 5. Patrones de llenado y su rango de densidades	26
Tabla 6. Espesor de las probetas impresas	34
Tabla 7: Coste de materiales consumibles por la impresora Mark Two®	36
Tabla 8: Coste de accesorios y piezas más comunes de la impresora Mark Two®	36
Tabla 9. Mantenimiento diario, a medio plazo y a largo plazo de la impresora Mark Two®	37
Tabla 10. Dimensiones y tiempos de impresión de todas las probetas diseñadas	41
Tabla 11. Dimensiones deseables para los tacos de las probetas	42
Tabla 12. Dimensiones finales de los tacos	42
Tabla 13. Dimensiones de todas las probetas impresas de fibra de carbono	48
Tabla 14. Dimensiones de todas las probetas impresas en fibras de vidrio	48
Tabla 15. Parámetros de ensayo	56
Tabla 16. Características de la probeta de Onyx	58
Tabla 17. Resultados experimentales tracción probetas grandes de FC	60
Tabla 18. Resultados experimentales tracción probetas medianas de FC	63
Tabla 19. Resultados experimentales tracción probetas pequeñas de FC	65
Tabla 20. Resultados experimentales tracción probetas grandes de FV	67
Tabla 21. Resultados experimentales tracción probetas medianas de FV	70
Tabla 22. Resultados experimentales tracción probetas pequeñas de FV	72
Tabla 23. Volumen y resistencia media a la tracción de las probetas de FC	73
Tabla 24. Volumen y resistencia media a la tracción de las probetas de FV	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Optimización topológica de la unión de 5 tubos [5]	4
Figura 2-2: Estimación de los costes de producción de la fabricación aditiva frente a otros métodos de fabricación [6].	5
Figura 2-3. Esquema del funcionamiento de FDM [2]	6
Figura 2-4. (a) Esquema del proceso de la distancia de impresión negativa, (b) imagen del proceso llevado a la práctica [10]	7
Figura 2-5. Esquema del funcionamiento del SLS [2]	7
Figura 2-6. Esquema representativo del LOM [2]	8
Figura 2-7. Esquema del funcionamiento de la SLA [2]	9
Figura 2-8. Esquema del funcionamiento del <i>Injet Printing</i> [2]	9
Figura 2-9. Álabes fabricados por Siemens mediante fabricación aditiva [12]	11
Figura 2-10: Pistones para el Porsche 911 GT2 RS fabricados con tecnología de Fabricación Aditiva [13]	11
Figura 2-11. Impresora 3D de venta al particular	12
Figura 2-12. Prótesis fabricada mediante SLS	12
Figura 2-13. Impresión 3D de un muro en la universidad de Eindhoven [5]	13
Figura 2-14. Fabricación Aditiva mediante FDM con el uso de fibras cortas [14]	14
Figura 2-15. Impresora 3D de materiales compuestos de fibra continua [14]	14
Figura 3-1. a) Tensiones en la interfase ($z = h_0$), b) Variación de σ_{xz} en el espesor ($y = b$) [30]	13
Figura 4-1. Impresora Mark Two® imprimiendo una probeta	15
Figura 4-2. Pantalla de la impresora Mark Two®	15
Figura 4-3. Proceso de impresión de probetas de fibra de carbono en la impresora Mark One® [23]	16
Figura 4-4. Bobina de nylon en su caja pelícano	18
Figura 4-5. Bobina de Onyx en su caja pelícano	18
Figura 4-6. Bobina de 50 cm ³ fibra de vidrio [29]	19
Figura 4-7. Bobina de 50 cm ³ de fibra de carbono [29]	19
Figura 4-8. Bobina de 50 cm ³ de Kevlar® [29]	20
Figura 4-9. Probeta diseñada en CATIA	21
Figura 4-10. Menú inicial de Eiger	22
Figura 4-11. Menú de impresoras de Eiger	23
Figura 4-12. Botón de importar de Eiger	23
Figura 4-13. Menú de edición de Eiger	24
Figura 4-14. Columna derecha del menú de edición	24
Figura 4-15. Menú de Part Settings General	25
Figura 4-16: Menú de Part Settings Settings	25
Figura 4-17: Menú de Part Settings Infill	26

Figura 4-18. Relleno Sólido [27]	27
Figura 4-19. Relleno triangular [27]	27
Figura 4-20. Relleno Hexagonal [27]	27
Figura 4-21. Menú de refuerzos	27
Figura 4-22. Pieza con Isotropic Fiber [28]	28
Figura 4-23. Pieza con refuerzo de <i>All Walls</i> [28]	28
Figura 4-24. Pieza con refuerzo de <i>Outer Shell Only</i> [28]	28
Figura 4-25. Pieza con refuerzo de <i>Inner Shell Only</i> [28]	28
Figura 4-26. Menú de Internal View de una probeta	29
Figura 4-27. Datos del menú de visión interna referentes a la pieza	29
Figura 4-28. Capa de fibra de carbono en el Internal view	30
Figura 4-29. Capa de Onyx en el internal view	30
Figura 4-30. Parámetros de impresión disponibles dentro del <i>Internal View</i>	30
Figura 4-31. Menú de impresión de Eiger	31
Figura 4-32. Parámetros para el posicionamiento de la pieza dentro de la cama de impresión	31
Figura 4-33. Probeta de estudio diseñada en CATIA	32
Figura 4-34. Probeta de una capa en Eiger	33
Figura 4-35. Probeta de dos capas en el internal view de Eiger	33
Figura 4-36. Probeta con un espesor de 0,575 mm en Eiger	34
Figura 4-37. Primera capa de fibra impresa en las 3 probetas de estudio	34
Figura 4-38. Micrómetro usado para medir el espesor de las probetas	34
Figura 4-39. Visión interna de la probeta con un ancho de 3,6 mm de ancho	35
Figura 4-40. Visión interna de la probeta con un ancho de 3,7 mm de ancho	35
Figura 4-41. Interior de la probeta de 3,7 mm donde se pueden ver los 3 hilos	35
Figura 4-42. Bobina de fibra de carbono al 50 %	36
Figura 5-1. Parámetros de impresión usados para la fabricación de las probetas	40
Figura 5-2. Probeta de fibra de carbono de tamaño grande en Eiger	41
Figura 5-3. Probetas de fibra de carbono recién impresas	43
Figura 5-4. Delaminación parcial de una probeta de fibra de carbono grande vista desde arriba	43
Figura 5-5. Delaminación parcial de una probeta de fibra de carbono grande vista desde el lateral	43
Figura 5-6. Almacenamiento de las probetas en una campana de secado	44
Figura 5-7. Impresión de las probetas de fibra de vidrio pequeñas	44
Figura 5-8. Decoloración de la capa superior en una probeta de fibra de vidrio mediana	45
Figura 5-9. Fallo de impresión durante la impresión de probetas de vidrio de gran tamaño	45
Figura 5-10. Probeta grande de fibra de vidrio con brim	46
Figura 5-11. Deformaciones en la probeta nº 7 de fibra de vidrio grande	46
Figura 5-12. Probetas de fibra de vidrio impresas	47
Figura 5-13. Pie de rey	47
Figura 5-14. Reloj medidor	47

Figura 5-15. Panel de fibra de vidrio del que se van a extraer los tacos	49
Figura 5-16. Adhesivo bicomponente usado para pegar los tacos a las probetas	50
Figura 5-17. Pinzas usadas para agarrar los tacos a las probetas	50
Figura 5-18. Probetas de fibra de carbono con los tacos ya pegados	51
Figura 5-19. Extremo recortado de la grande n° 4, donde se puede apreciar el desnivel en los tacos.	51
Figura 5-20. Probetas de grandes de carbono con los tacos ya lijados	52
Figura 5-21. Lado afectado de las probetas de fibra de vidrio	52
Figura 5-22. Proceso de pegado de los tacos en las probetas de vidrio	53
Figura 5-23. Probetas de fibra de vidrio con los tacos pegados	53
Figura 5-24. Morzadas usadas para los ensayos	54
Figura 5-25. Máquina estática de ensayos Instron 4482	54
Figura 5-26. Galga 6/120 XY 31	54
Figura 5-27. Galga 3/120 LY41	55
Figura 5-28. Galga extensométrica 3/120 LY41	55
Figura 5-29. Extensómetro 2630-112	55
Figura 5-30. Gráfico de cómo se va a eliminar el Onyx numéricamente	56
Figura 5-31. Disposición de las galgas y las probetas para determinar la rigidez y resistencia del material [31]	57
Figura 5-32. Probeta de Onyx	58
Figura 5-33. Probeta de Onyx	58
Figura 5-34. Diagrama Tensión-Deformación del ensayo con Onyx	59
Figura 5-35. Probetas grandes de FC listas para el ensayo	60
Figura 5-36. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas grandes de FC	61
Figura 5-37. Probetas de FC grandes una vez ensayadas	61
Figura 5-38. Detalle del fallo de la P1 grande de FC	62
Figura 5-39. Detalle del fallo de la P3 grande de FC	62
Figura 5-40. Probetas medianas de FC listas para el ensayo	62
Figura 5-41. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas medianas de FC	64
Figura 5-42. Probetas de FC medianas una vez ensayadas	64
Figura 5-43. Probetas pequeñas de FC listas para el ensayo	65
Figura 5-44. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas pequeñas de FC	66
Figura 5-45. Probetas de FC pequeñas una vez ensayadas	66
Figura 5-46. Probetas de FV listas para el ensayo de tracción	67
Figura 5-47. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas Grandes de FV	68
Figura 5-48. Ensayo de tracción de una probeta grande de FV	69
Figura 5-49. Probetas de FV grandes una vez ensayadas	69
Figura 5-50. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas medianas de FV	70
Figura 5-51. Probetas medianas de FV una vez ensayadas	71
Figura 5-52. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas pequeñas de FV	72

Figura 5-53. Probetas pequeñas de FV una vez ensayadas	73
Figura 5-54. Representación logarítmica de la resistencia de las probetas de FC frente a su volumen	74
Figura 5-55. Representación logarítmica de la resistencia de las probetas de FV frente a su volumen	75
Figura 5-56. Representación logarítmica de la resistencia de las probetas mediana y grande de FV frente a su volumen	76
Figura 6-1. Fallo de la impresora al separarse el cabezal el tubo del cabezal de extrusión.	77
Figura 6-2. Desprendimiento del tubo del cabezal de impresión	77
Figura 6-3. Hilos y defectos depositados por la máquina a causa del plástico mojado	78
Figura 6-4. Delaminaciones de la capa de Onyx en una probeta de fibra de vidrio	79
Figura 6-5. Error grave de impresión generado por un efecto dominó	79
Figura 6-6. Detalle de la deformación residual presente en la probeta grande de vidrio n° 7	80
Figura 7-1. Ejemplo de una posible serie de ensayos futuros [17]	83

Notación

AM	Additive Manufacturing (Fabricación Aditiva)
FMD	Fused Deposition Modelling (Modelado por Deposición Fundida)
SLA	Stereolithography (Estereolitografía)
SLS	Selective Laser Sintering (Sinterización Selectiva por Láser)
SLM	Selective Laser Melting (Fundición Selectiva por Láser)
EBM	Electron Beam Melting (Fundición Mediante Haz de Electrones)
SHS	Selective Heat Sintering (Sinterización Selectiva por Calor)
3DP	Three-dimensional Printing (Impresión Tridimensional)
LOM	Laminated Object Manufacturing (Laminado en Capas)
DED	Direct Energy Deposition (Deposición Directa de Energía)
E11	Módulo de rigidez en el eje longitudinal a la fibra
Xt	Resistencia a la tracción en el eje longitudinal a la fibra
Yt	Resistencia a la compresión en el eje longitudinal a la fibra
E	Módulo de Young
FC	Fibras de carbono
FV	Fibra de vidrio
P1	Probeta 1
<i>m</i>	Módulo de Weibull

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la inmensa mayoría de industrias se trabaja con una combinación de procesos de fabricación conformativos o sustractivos. En los procesos conformativos se fuerza al material a adaptar su forma a moldes para conseguir la geometría deseada. En los procesos sustractivos se parte del material en masa y se elimina parte de este mediante diferentes medios como el mecanizado o lijado para obtener el resultado deseado.

Sin embargo, en las últimas décadas otro método de fabricación está tomando más y más relevancia en numerosos sectores: la fabricación aditiva. Con este método se fabrica una pieza partiendo de un archivo de CAD que luego es fabricado en una impresora 3D sin ninguna pérdida de material. Gracias a sus numerosas ventajas como: un prototipado rápido, la capacidad de producir estructuras muy complejas y reducción de maquinaria necesaria, esta tecnología cada vez gana más terreno dentro de la industria. Una industria basada casi al 100 % en diseños 3D, que facilita mucho el proceso de fabricación aditiva. Este tipo de tecnología permite, en ciertos casos, a una sola persona con una impresora fabricar algo que hace apenas 20 años hubiese necesitado un grupo de ingenieros, operarios y un gran número de máquinas.

Actualmente incluso unas de las principales desventajas de este método, su mala escalabilidad, se está mejorando considerablemente. Esto es gracias a la fabricación de camas de impresión rotativas que son capaces de imprimir 24 horas a día sin la necesidad de intervención humana a la par del desarrollo de máquinas más rápidas y precisas.

En cuanto a la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras, son necesarios una serie de procesos que encarecen estos materiales considerablemente. En primer lugar, se parte de una serie de láminas de material preimpregnado con resina que hay que cortar a la medida concreta, perdiendo cierta cantidad de material en el proceso. A continuación, hay que fabricar un molde para esta pieza que, si se van a realizar un número limitado de estas, encarece enormemente el proceso. Una vez se tiene el molde hay que apilar el material e introducirlo junto a este en una bolsa de vacío. Hecho esto hay que introducir el molde con el material en un autoclave tan grande como la pieza para curar la resina y eliminar huecos en el material.

Con un proceso de fabricación aditiva no solo no son necesarios los moldes ni recortar el material, además se prescinde el autoclave al usar polímeros termoplásticos. Estos polímeros no necesitan un proceso de curado y hacen posible el reciclado de los materiales compuestos, mejorando así las perspectivas de un futuro sostenible para este tipo de materiales. Por ello una tecnología avanzada de fabricación aditiva con materiales compuestos podría reducir considerablemente los costes de fabricación y abrir las puertas a muchas otras industrias a la utilización de este tipo de materiales.

1.1 Objetivo del Trabajo Fin de Grado

El objetivo de este proyecto de fin de grado es la puesta a punto y caracterización de probetas de material compuesto fabricadas con la impresora Mark Two[®], así como la determinación del efecto escala en dichas probetas. Para ello se van a diseñar e imprimir una serie de probetas con 3 tamaños distintos de fibra de carbono y de fibra de vidrio. Una vez fabricadas se realizarán ensayos de tracción para obtener su rigidez, resistencia y coeficiente de Poisson. Concluidos los ensayos se estudiarán los datos obtenidos para comprobar la existencia o no de un efecto escala en los materiales compuestos fabricados con la impresora Mark Two[®].

Durante la realización de este proyecto se va a intentar hacer una descripción exhaustiva de todo el proceso, dejando así constancia del porqué de los resultados obtenidos y facilitando la continuación del camino de investigación alrededor de esta impresora 3D.

1.1 Estructura del documento

Este documento se va a separar en siete capítulos diferenciados cuyos contenidos son:

- Capítulo 2: Tecnologías de fabricación aditiva. En este capítulo se va a describir en qué consiste la fabricación aditiva, sus ventajas e inconvenientes y los distintos métodos existentes.
- Capítulo 3: Efecto escala. En este capítulo se va a describir en qué consiste el efecto escala y sus distintos impactos en los materiales compuestos.
- Capítulo 4: Impresora Mark Two[®]. En este capítulo se va a mostrar el funcionamiento y características de la impresora 3D Mark Two[®]. Además, se dará una descripción detallada de los aspectos más importantes del programa Eiger junto a ciertos ensayos diseñados para comprobar su correcto funcionamiento.
- Capítulo 5: Diseño y realización de ensayos. En este capítulo se verá el proceso del diseño de los ensayos, su realización y los resultados de estos.
- Capítulo 6: Recomendaciones y fallos de impresión. En este capítulo se mostrarán algunos fallos ocurridos durante la realización del proyecto.
- Capítulo 7: Conclusiones y desarrollos futuros. En este capítulo se expondrán las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del proyecto, así como las posibles nuevas investigaciones relacionadas con este.

Capítulo 2: FABRICACIÓN ADITIVA

2.1 Introducción

La fabricación Aditiva es un método de fabricación basado en la impresión capa a capa de la pieza a fabricar, pudiendo conseguir geometrías complejas partiendo de un modelo de CAD. Ya en 1981 Hideo Kodama emitió una patente en Japón para un proceso de curado de resina mediante rayo láser, pero esta patente nunca fue aprobada [1]. Finalmente, esta tecnología fue desarrollada por primera vez gracias a Charles Hull en 1986 mediante el proceso llamado estereolitografía (SLA). Este fue el primer método del llamado prototipado rápido. Dicho método permitía la creación de prototipos de una manera más fácil, rápida y económica que las opciones disponibles en ese momento [2]. Tras la Estereolitografía surgieron numerosos métodos de Fabricación Aditiva como la Sinterización Selectiva por Láser, el Modelado por Deposición Fundida y el Laminado por Capas. El desarrollo de estos métodos, junto al abaratamiento tanto de las impresoras como del material han expandido enormemente el uso de este tipo de tecnología a todo tipo de industrias, laboratorios, escuelas y hogares.

2.2 Ventajas e inconvenientes de la fabricación aditiva

Las ventajas de la fabricación aditiva la hacen muy interesante para múltiples aplicaciones, pero es importante conocer sus limitaciones actuales y en qué momentos está justificado o no su uso [2] [3] [4].

Ventajas

- Reducción de los tiempos de producción: la facilidad con la que se puede prototipar una pieza y fabricarla también implica que, para la mayoría de los casos, diseñar y fabricar un producto se puede convertir en tarea de semanas en vez de meses. Un ejemplo claro y reciente de esto han sido los protectores faciales que se usaron al comienzo de la pandemia de COVID-19. En cuestión de semanas se fabricaron un gran número de estos gracias a las impresoras 3D particulares e industriales, superando por meses el tiempo de respuesta a las piezas de moldes de inyección de plástico con los que se suelen fabricar.
- Reducción de coste para volúmenes bajos de producción: el coste de las piezas para un volumen bajo de producción se ve claramente reducido gracias al uso de la tecnología de fabricación aditiva. Existen numerosos motivos de esta reducción. Entre ellos encontramos la reducción del tiempo de diseño, prototipado y fabricación. Otro factor muy importante es que este tipo de tecnología no necesita ningún tipo de utillaje y requiere pocas consideraciones para la fabricación de la pieza. Además, a diferencia de otros procesos de fabricación, como los CNC, el material se aprovecha casi al 100 % y no es necesario partir de planchas o tochos, en los que se elimina una gran parte del material.

- **Facilidad de fabricación y modificación:** el proceso de fabricación es sencillo en comparación con otros métodos de fabricación que requieren un conocimiento en profundidad de procesos de moldeado, tiempos y temperaturas exactas para unos buenos acabados, además de un control constante de la numerosa maquinaria. Partiendo del archivo de CAD se hace mucho más sencillo fabricar la misma pieza con la impresora 3D que de un metal o plástico con un proceso de CNC, fundición o inyección, sobre todo si la pieza es compleja. Aparejado a esto viene una fácil adaptabilidad a ligeros cambios en el diseño durante la vida útil del producto, sin necesidad de hacer ningún cambio físico al proceso de producción.
- **Optimización topológica:** la fabricación aditiva permite hacer un uso mucho más directo y óptimo de los módulos de optimización topológica que integran en la actualidad la mayoría de los programas de elementos finitos. Este método permite, una vez dado el material y las condiciones del problema, eliminar de las zonas innecesarias el material sobrante comprobando que la estructura tiene la resistencia y rigidez requeridas. Este método, cómo se puede ver en la Figura 2-1 [5], ofrece figuras muy complejas que se hacen prácticamente imposibles de fabricar con los métodos convencionales de fabricación por lo que o no se usan o se simplifican enormemente los resultados. Sin embargo, en la impresión 3D este tipo de estructuras no presentan dificultad extra, además reduce el tiempo y el coste de fabricación de la estructura ya que requieren de menos material para el mismo resultado.

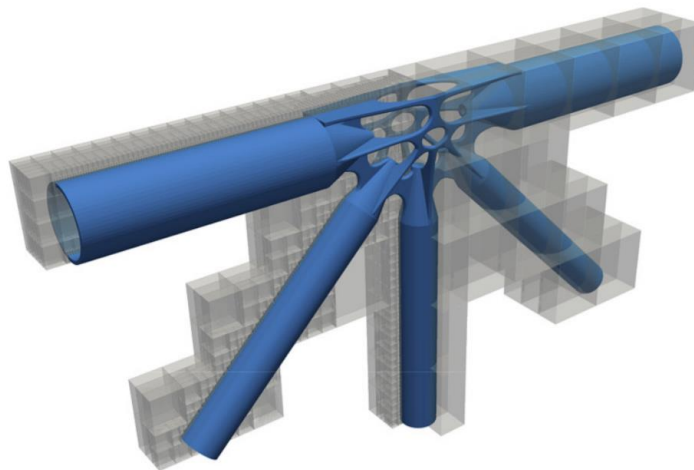


Figura 2-1. Optimización topológica de la unión de 5 tubos [5]

Inconvenientes

- **Acabado superficial:** En general el acabado final de las impresoras 3D es relativamente pobre en comparación con otros métodos de fabricación. Por ejemplo, un torno es capaz de, en la misma máquina con las mismas herramientas, dar unas pasadas de desbaste y una última de acabado, reduciendo así enormemente el tiempo de fabricación de una pieza. Por contraparte en la fabricación aditiva con la mayoría de procesos el acabado viene ligado con el tiempo de impresión. A mejor acabado la impresora trabajará más lento y con capas más finas, aumentando el tiempo de impresión de una manera considerable.

- **Material anisótropo:** Las piezas fabricadas con la mayoría de los procesos de fabricación aditiva tienen un comportamiento anisótropo. En contraposición, estas mismas piezas con materiales similares fabricados con otros métodos como la inyección suelen ser isotrópicos. Esto dificulta el proceso de diseño y los trabajos como la soldadura, corte y realización de taladros ya que el comportamiento se hace más impredecible y es necesario un estudio más en profundidad.
- **Reducción de propiedades:** Los materiales de las piezas fabricadas con tecnologías de fabricación aditiva tienen, en la mayoría de los casos, unas propiedades mecánicas considerablemente inferiores a las de estos mismos materiales fabricados con otros métodos. Esto es debido a los numerosos defectos interiores, tratamientos térmicos poco deseables y una mala adhesión entre capas entre otras.
- **Pobre escalado:** En la mayoría de los métodos de fabricación a medida que se aumenta la producción de una pieza o producto el precio suele bajar considerablemente. Esto es gracias a la reducción de los costes fijos por pieza y mejoras en la eficiencia de la fabricación. Sin embargo, cómo se puede ver en Figura 2-2 para los métodos de fabricación aditiva los costes son prácticamente constantes sin importar el número de piezas. Es por lo que, actualmente, este tipo de tecnología se ve excluida de producciones a gran escala.

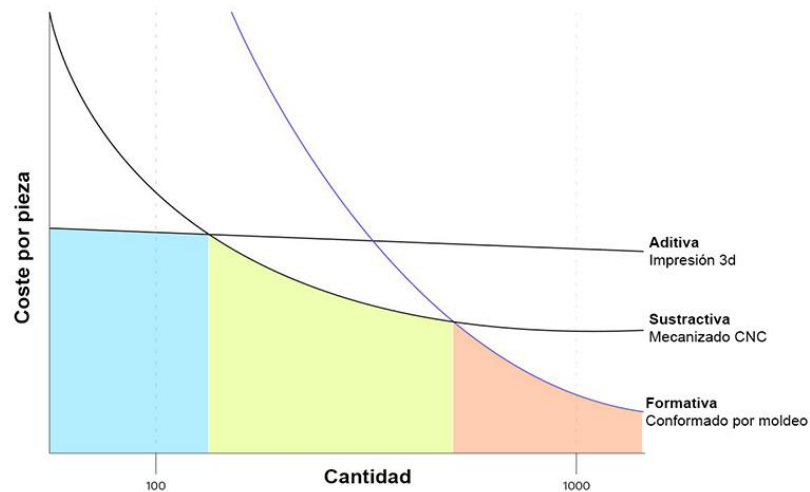


Figura 2-2: Estimación de los costes de producción de la fabricación aditiva frente a otros métodos de fabricación [6].

- **Número de materiales limitados y a mayor precio:** Actualmente la oferta de materiales disponibles para la impresión 3D está muy limitada comparada con la gran oferta de materiales disponible en la industria. Actualmente los materiales más abundantes para la fabricación aditiva son los polímeros, e incluso de estos sólo están disponibles una fracción de los comercialmente usados. Esta gran limitación se prevé mejorará a medida que avance la tecnología. Por otra parte, la mayoría de los materiales usados para la fabricación aditiva tienen un precio muy superior a los convencionales. Por ejemplo, el acero inoxidable 316L, un material de uso relativamente común, tiene un precio de entre 15 y 60 veces superior [7] [8] [9] dependiendo del método de fabricación, al material que se pudiera comprar en masa en una acería.

2.3 Tipos de tecnologías de fabricación aditiva [2] [10]

Dentro de la fabricación aditiva existen numerosas tecnologías distintas, cada una con sus puntos fuertes y debilidades, lo que las hace recomendables para una u otra aplicación. A continuación, se describirán los principales métodos de AM:

1. Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Es sin duda el método más usado dentro de la fabricación aditiva. La mayoría de impresoras del mercado de impresión de plásticos usan este método de fabricación, por su bajo coste, poca complejidad y buenas propiedades en comparación con otros métodos. En este método el filamento de un polímero termoplástico se calienta hasta un estado semi líquido para luego ser depositado capa a capa sobre la pieza, fundiendo parcialmente el material base y soldado unas capas a otras. En la Figura 2-3 se muestra un esquema de su funcionamiento.

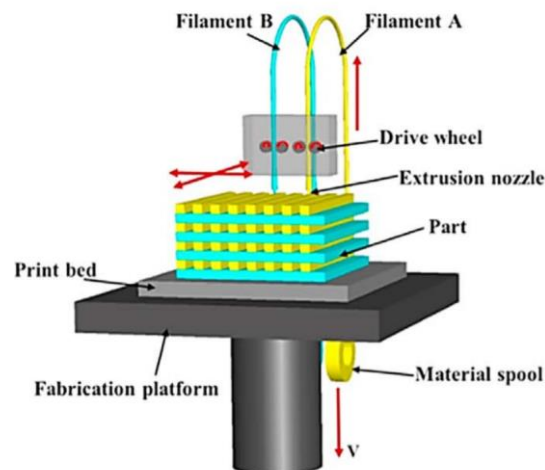


Figura 2-3. Esquema del funcionamiento de FDM [2]

Uno de los mayores inconvenientes de este método son los largos tiempos de impresión. Al imprimirse los filamentos uno a uno, es relativamente fácil que los tiempos de impresión lleguen a las decenas de horas. Para solucionar este problema se puede aumentar tanto la velocidad del cabezal así como el espesor de las capas, sin embargo, ambos cambios resultan en una peor calidad de impresión, tanto en precisión dimensional como de adherencia entre capas.

Otro de los inconvenientes de este método es la habitual pobre adherencia entre capas de la impresión 3D. Por ello se recomienda que la pieza nunca trabaje en la dirección perpendicular a este plano e intentar reducir al máximo las tensiones de cizalladura en estos planos. Para solucionar este problema con los termoplásticos se ha propuesto una refundición parcial de las piezas para mejorar la unión entre capas, pero este calentamiento generalizado puede degradar el material permanentemente.

Este método de fabricación tiende a introducir numerosos poros dentro del material, ya que a medida que se depositan las fibras quedan huecos por rellenar dentro de la estructura. Para solucionar este problema se han propuesto numerosas soluciones. Una de ellas consiste en desalinear las capas para que los valles de una coincidan con las fibras de la otra y así mejorar la fracción de empaquetamiento de los cilindros. Otra opción podría ser imprimir con una distancia negativa entre pasadas para mejorar la adhesión entre capas. En la Figura 2-4 se muestra tanto un esquema del concepto (a) como una imagen del concepto llevado a la práctica (b).

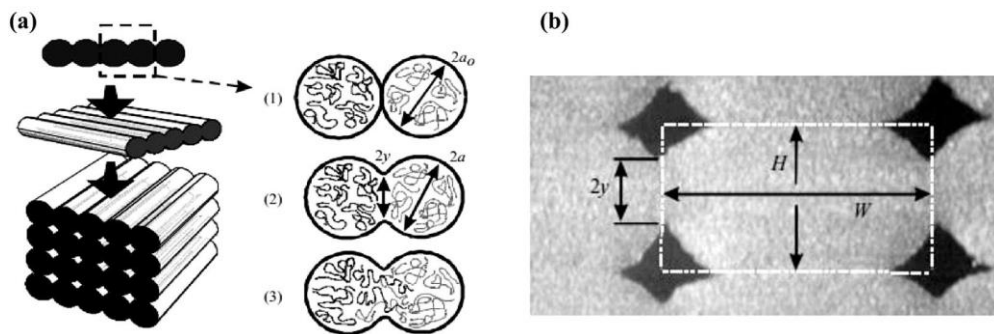


Figura 2-4. (a) Esquema del proceso de la distancia de impresión negativa, (b) imagen del proceso llevado a la práctica [10]

2. Fusión de polvo sobre cama de impresión

Dentro de este tipo de tecnología de fabricación aditiva se engloban numerosos métodos, pero todos ellos siguen un mismo principio:

Este tipo de tecnología se basa en la deposición de polvo muy fino sobre la superficie desde donde se va a fabricar la pieza. El polvo en cada capa se une gracias a un láser o a un aglutinante y las siguientes capas se unen unas encima de las otras hasta acabar el modelo 3D. El polvo restante, que sirve como soporte durante la impresión, se extrae con un aspirador al final si fuese necesario. Los principales métodos que usan esta tecnología son:

- Sinterización selectiva por láser (SLS):

Este método busca la sinterización de las partículas mediante un láser sin llegar a fundir el material, uniendo a escala molecular el polvo de este. En la Figura 2-5 se puede ver un esquema del funcionamiento de esta tecnología. Con este método se pueden usar un gran número de materiales como termoplásticos, aleaciones y cerámicas.

Las propiedades obtenidas con este método son parecidas a las del material en masa. Además, a este tipo de proceso de fabricación puede incluirse fibras tanto de carbono como de vidrio, aumentando las propiedades mecánicas del material base.

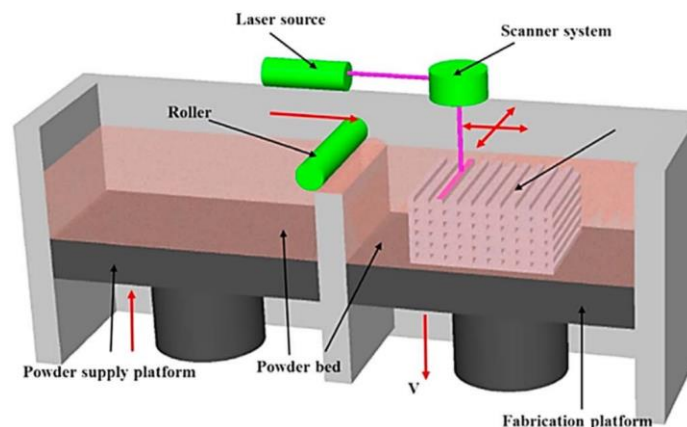


Figura 2-5. Esquema del funcionamiento del SLS [2]

- Fundición selectiva por láser (SLM):

Sigue un método muy parecido al SLS pero en este caso se llega a fundir completamente el material. Esta tecnología se puede usar con la mayoría de termoplásticos, pero solo con una pequeña parte de aleaciones metálicas como las aceros y el aluminio. Las propiedades mecánicas de estas piezas son muy parecidas al del material en masa.

- Fusión por haz de electrones (EBM) [11]:

Este método usa un haz de electrones de alta energía para fundir el polvo de una manera parecida al láser en el SLM. Esta tecnología se usa para aleaciones con un alto punto de fusión como las de titanio o níquel, obteniendo unas propiedades mecánicas parecidas al metal base.

- Sinterizado selectivo por calor (SHS):

Este método se usa exclusivamente en termoplásticos. Su funcionamiento muy parecido al SLM, diferenciando de este que el SLM funde las capas de polvo con un láser y las del SHS con calor.

- Proyección de aglutinante (3DP):

Esta tecnología usa un aglutinante líquido el cual se proyecta sobre el polvo del material base para unirlo. Este método es usado principalmente para materiales refractarios cuyos resultados con SLS no son deseables. Por otra parte, las porosidades son mayores y la resistencia mecánica menor que con otros métodos como el SLS o SLM.

3. Laminated object manufacturing (LOM)

Este método de fabricación se basa en la impresión capa a capa mediante el corte de las láminas del material base, ya sea por medios mecánicos o láser y su pegado con rodillos. En la Figura 2-6 se muestra un esquema de su funcionamiento. Este método permite acelerar considerablemente los tiempos de fabricación, sobre todo de piezas de gran tamaño, ya que cada pasada se realiza con la prácticamente la misma velocidad sin importar el tamaño de la capa.

Los mayores problemas con este método son el pobre aprovechamiento del material usado y la adhesión entre capas, que no suele ser suficiente.

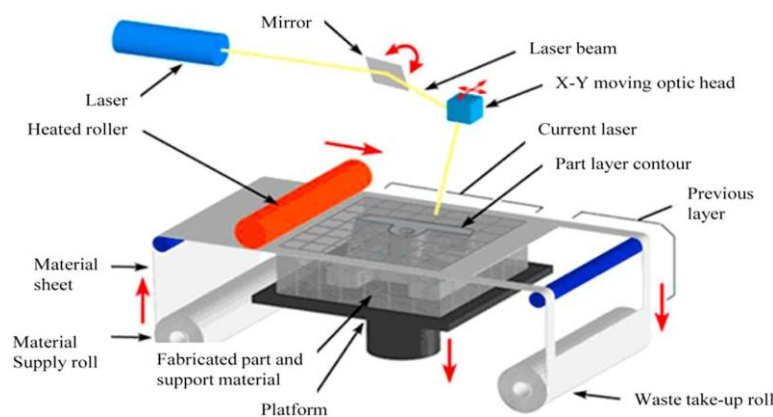


Figura 2-6. Esquema representativo del LOM [2]

4. Estereolitografía (SLA)

Este método de fabricación ha sido uno de los primeros en aparecer en la industria para fabricar piezas de material polimérico. Esta tecnología usa luz UV para polimerizar la resina fotopolimérica capa a capa dentro del tanque dónde se fabrican las piezas. Una vez se ha finalizado se retira la resina restante, la cual se reutiliza. En la Figura 2-7 se muestra un esquema del funcionamiento de este método. Para mejorar las propiedades mecánicas de la pieza una vez ha sido impresa se suelen llevar a cabo procesos de curado mediante calor o más luz UV.

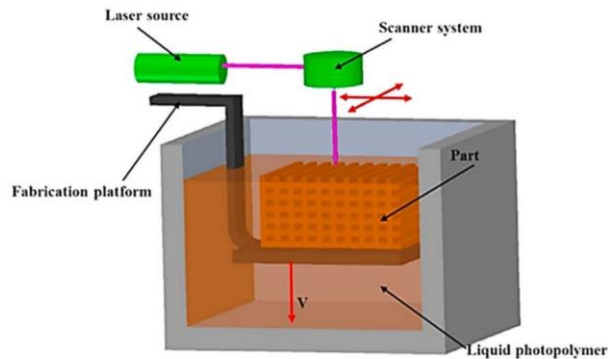


Figura 2-7. Esquema del funcionamiento de la SLA [2]

5. *Contour Crafting* e Impresión mediante tinta

La impresión mediante tinta o *Injet Printing* es la principal tecnología de fabricación aditiva para las cerámicas. En este método una suspensión estable como puede ser agua con óxido de circonio se bombea y se deposita en el sustrato dónde se desee añadir. Este material se solidifica lo suficientemente rápido como para seguir depositando capas una encima de otra hasta acabar la pieza o estructura. En la Figura 2-8 se puede observar un esquema del funcionamiento de esta tecnología.

Para el hormigón y el cemento se usa el método de *contour crafting*, el cual solidifica añadiendo el agua a su estructura molecular. En la impresión con tinta se usa un disolvente presente en el material antes de extruirlo. Una vez se ha depositado se evapora rápidamente este disolvente, dejando la estructura con unas buenas propiedades mecánicas detrás.

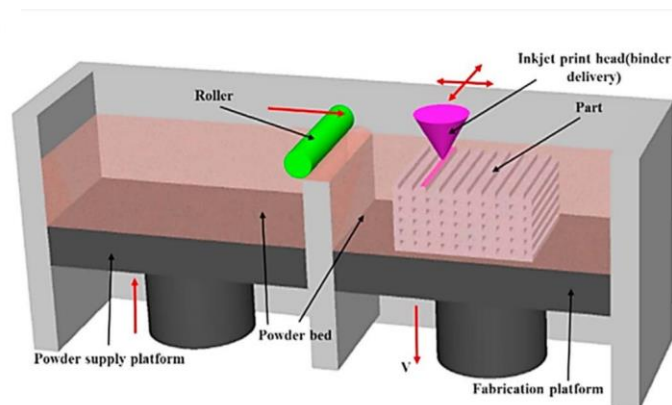


Figura 2-8. Esquema del funcionamiento del *Injet Printing* [2]

6. Deposición Directa de Energía (DED)

La Deposición directa de Energía (DED) o Deposición Directa de Metal (DMD) entre otras denominaciones ha sido tradicionalmente usada para la fabricación de superaleaciones de níquel de altas prestaciones. Este método consiste en la adición y fundición simultánea mediante un láser de alta potencia en una zona muy concreta del material añadido, ya sea un filamento o polvo. Este método puede usarse incluso para reparar o modificar piezas ya fabricadas, incluidas aquellas que no se han fabricado mediante DED. Además, con este método de fabricación aditiva se pueden hacer uso de la fabricación sustractiva como tornos o fresadoras para mejorar los acabados. En cuanto a los materiales que puede hacer uso esta tecnología están: aluminio, acero, titanio y superaleaciones de níquel.

Este método puede reducir los costes de reparación y fabricación de piezas a la par de tener unas propiedades mecánicas excelentes a parte de una microestructura y composición controladas en el producto final.

A continuación, en la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales tecnologías de Fabricación Aditiva

Tabla 1. Resumen de las principales tecnologías de fabricación aditiva y sus características

Método	Materiales	Aplicaciones	Ventajas	Inconvenientes
FDM	Filamentos de polímeros y polímeros reforzados con fibras	Prototipado rápido Juguetes Piezas de materiales compuestos	Bajo coste Veloz Simplicidad	Propiedades mecánicas pobres para los polímeros Materiales muy limitados
Fusión de polvo	Polvos finos de metales, aleaciones y ciertos polímeros (SLS y SLM), polímeros y cerámicas (3DP)	Biomedicina, electrónicas, aeroespaciales Estructuras ligeras	Buena resolución Alta calidad de impresión	Caro Proceso lento Acabado a capas
<i>Contour Crafting</i> e impresión con tinta	Cerámicas, hormigón y cemento Concentración de partículas en un líquido	Edificios Grandes estructuras Biomedicina	Buena resolución Alta calidad de impresión	Resolución
SLA	Resina con monómeros fotoactivos Polímeros con partículas cerámicas	Prototipado Biomedicina	Buena resolución Calidad de impresión	Materiales muy limitados Caro Impresión lenta
DED	Metales y aleaciones en forma de hilo o polvo Cerámicas y polímeros	Industria aeroespacial Reparaciones Reequipamiento, revisiones y revestimientos	Tiempos y costes de fabricación reducidos Propiedades mecánicas excelentes Microestructura controlada	Poca precisión Acabado pobre Necesidad de una estructura de soporte densa
LOM	Compuestos con matriz polimérica Cerámicas Papel Rollos con insertos de metal y chapas de metal	Fabricación de papel Industrias de fundición Electrónica	Cantidad de maquinaria y tiempos de producción reducidos Gran cantidad de materiales disponibles a un coste bajo Excelente para grandes estructuras o piezas	Acabados interiores y precisión dimensional pobre Muy limitada para la fabricación de estructura complejas

2.4 Aplicaciones de la Fabricación Aditiva

Actualmente cada vez más industrias están invirtiendo y decantándose por la fabricación aditiva gracias a las múltiples ventajas que esta ofrece. Estas industrias suelen ser aquellas dónde el número de piezas que se fabrican son limitadas y con formas complejas. Algunos de los ejemplos más importantes son:

- **Industria Aeroespacial**

Actualmente la industria aeroespacial supone alrededor del 18,2 % del mercado total de la fabricación aditiva, y se espera que crezca en los próximos años [2]. Esto es principalmente por las características tan específicas del sector aeroespacial: geometrías complejas, materiales difíciles de mecanizar, su facilidad para adaptarse a modificaciones entre lotes y unas excelentes propiedades mecánicas específicas. Un ejemplo de este tipo de piezas son los álabes como los de la Figura 2-9 cuya forma interior es muy compleja y se hace mucho más sencillos fabricarlos con AM [12].



Figura 2-9. Álabes fabricados por Siemens mediante fabricación aditiva [12]

- **Industria Automovilística**

La industria automovilística se ha convertido en uno de los sectores más interesados en el desarrollo de la fabricación aditiva en los últimos años. El sector automovilístico hace uso de la fabricación aditiva para el diseño y prototipado de las piezas de los automóviles de producción, reduciendo considerablemente los costes de desarrollo. En cuanto a los automóviles de altas prestaciones y de competición actualmente se usan aleaciones de metales ligeros como las de aluminio y titanio para fabricar piezas complejas como los pistones de la Figura 2-10 [13], bloques motor y suspensiones, reduciendo así su peso.



Figura 2-10: Pistones para el Porsche 911 GT2 RS fabricados con tecnología de Fabricación Aditiva [13]

- **Autoconsumo**

Gracias a la reducción drástica de los precios de las impresoras 3D de polímeros como el PLA uso se ha extendido en gran medida por todo el mundo. Este tipo de impresoras 3D como las de la Figura 2-11 son enormemente útiles tanto en proyectos a pequeña escala para acelerar su realización y reducir los costes, como una herramienta de fabricación al alcance de casi cualquiera. La impresión con FDM hace posible la fabricación casera de numerosas piezas que con otro método de fabricación sería imposible de realizar.



Figura 2-11. Impresora 3D de venta al particular

- **Sector Médico**

Este sector representa el 11 % del mercado de la Fabricación Aditiva, habiendo crecido desde 6 400 millones de dólares en 2016 hasta los 22 000 millones de dólares en el año 2020 [2]. Esta importancia es debida a la gran adecuación de esta tecnología de fabricación a las necesidades del sector. La gran complejidad de estas piezas, cómo implantes de titanio, las hace imposibles de fabricar mediante los métodos comúnmente usados en otras industrias. Además, esta tecnología permite una customización y adecuación específica para el paciente, sin que ello suponga un gran sobrecoste. En la Figura 2-12 se muestra un ejemplo de una prótesis fabricada con esta tecnología.

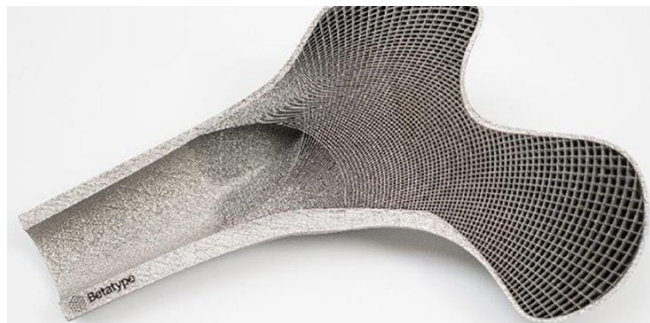


Figura 2-12. Prótesis fabricada mediante SLS

- **Ingeniería civil y arquitectura [5]**

Actualmente este sector solo representa el 3% de toda la industria de Fabricación Aditiva. Aun así, hay que tener en cuenta que no fue hasta 2014 cuando se empezaron a fabricar las primeras estructuras con una impresora 3D. Esta tecnología permite realizar estructuras mucho más complejas con un coste similar a los métodos de fabricación usados en la actualidad, y prescinde de la intensa mano de obra que este sector requiere actualmente. Los principales inconvenientes de esta tecnología es la maquinaria necesaria para fabricar una casa o un edificio residencial de un tamaño considerable, al tener que usar materiales más resistentes mecánicamente y al necesitar una impresora de gran tamaño. Un ejemplo de este tipo de tecnología lo tenemos en la Figura 2-13.



Figura 2-13. Impresión 3D de un muro en la universidad de Eidndhoven [5]

2.5 Fabricación aditiva con materiales compuestos [14]

La impresión 3D mediante el Modelado por Deposición Fundida, cómo ya se ha visto, es el método de fabricación aditiva más extendido gracias a su facilidad de uso y bajo coste. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los polímeros, aunque han mejorado considerablemente durante los últimos años, sigue siendo muy pobres, principalmente si se comparan con los materiales usados en la industria cómo el acero y el aluminio para la fabricación de piezas y estructuras. Sin embargo, estos plásticos se pueden reforzar con fibras ya sean de carbono, vidrio, Kevlar® entre otras, las cuales mejoran enormemente sus cualidades sin modificar sensiblemente el método de fabricación. Gracias a su gran versatilidad y una resistencia específica de estos materiales superiores al aluminio y al acero hace que sean en la mayoría de las ocasiones, en principio, un excelente sustituto para estos. Existen dos formas principales de impresión de materiales compuestos: La adición de partículas o fibras cortas y la adición de fibra continua.

- **Fibras cortas y partículas**

Estos refuerzos ya sean cerámicos o metálicos pueden suponer un aumento de resistencia mecánica considerable respecto al material base, sin necesidad de modificar significativamente el modo de fabricación. Lo único que sería necesario cambiar son los parámetros típicos de una impresora 3D: velocidad y temperatura de extrusión. Sin embargo, sus propiedades quedan lejos de las obtenidas con materiales compuestos de fibra continua. Este tipo de materiales pueden usarse en numerosos métodos de fabricación como el FDM, SLA, 3DP, LOM y *Contour Crafting*. Un ejemplo de la utilización de este tipo de materiales con la tecnología de FDM se puede observar en la Figura 2-14.

Actualmente ya se comercializa con cierto éxito numerosos materiales para impresión 3D reforzado con fibras cortas y partículas. Entre ellas se encuentran las de vidrio, carbono y en menor medida fibras de aramida. Un buen ejemplo es el Onyx™. Este material está compuesto de una matriz de nailon con partículas de carbono. Gracias a estas partículas se mejora considerablemente las propiedades mecánicas del material, aumentando en un 48 % el módulo de rigidez [15].

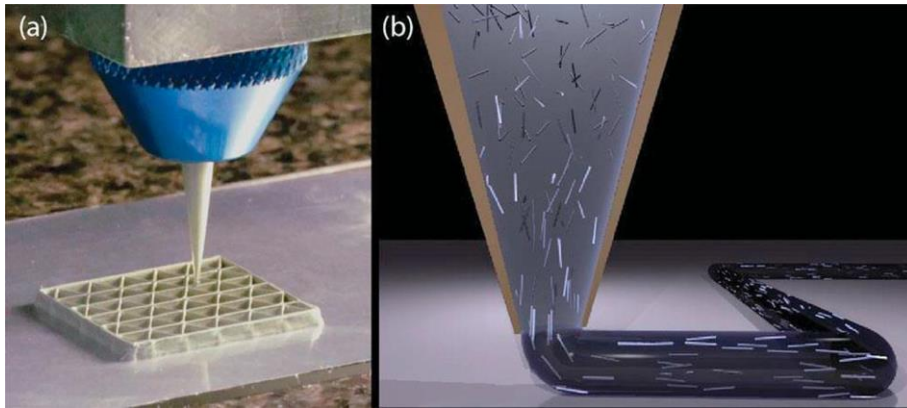


Figura 2-14. Fabricación Aditiva mediante FDM con el uso de fibras cortas [14]

- **Fibras Continuas:**

Con este tipo de refuerzo se obtienen unas propiedades mecánicas muy superiores a las de las fibras cortas o partículas, llegando a superar en ciertos aspectos a las aleaciones de aluminio. Este tipo de material se puede fabricar con dos métodos principalmente, LOM y FMD.

Para el método de LOM es muy fácil adaptar la tecnología, pero una vez fabricado el laminado es necesario el uso de un autoclave para el curado de la resina y una intervención mayor de personal. Con esta tecnología las propiedades mecánicas obtenidas son idénticas a las de los laminados actualmente usados en la industria.

Otro método de fabricación, es el FMD. En este método se usan termoplásticos como matriz para que puedan ser extruidos por el cabezal de la impresora 3D. Aunque las propiedades de estos compuestos puedan ser inferiores a las producidas por LOM, la intervención humana se reduce considerablemente y se simplifica el proceso de fabricación. Para la impresión con materiales compuestos de fibra continua se usan 2 técnicas:

- El material ya tiene el polímero y se van intercambiando dos cabezales durante la impresión, según se vaya imprimiendo sólo el polímero o la fibra impregnada con el polímero. Este método es el que usa la impresora Mark Two[®], objeto de estudio, para imprimir las piezas.
- La fibra no tiene el plástico y se impregna de este en el cabezal de la impresora como el de la Figura 2-15. Este método corre más riesgo de introducir poros en el material y es necesario controlar muy de cerca la mezcla. Sin embargo, solo necesita una boquilla, y al ser fibra sin impregnar hace que sea más barata por la posibilidad de comprar el material a compañías de material no prioritario.

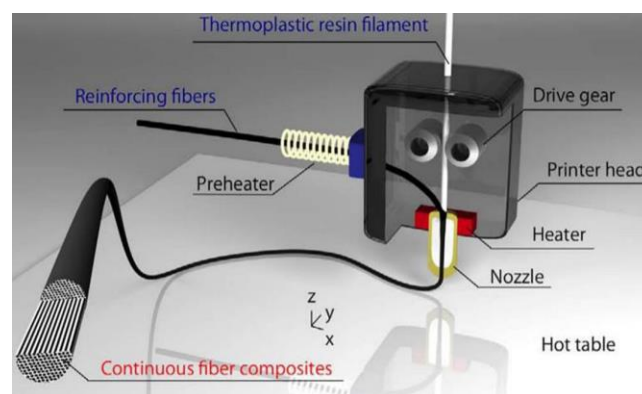


Figura 2-15. Impresora 3D de materiales compuestos de fibra continua [14]

Capítulo 3: EFECTO ESCALA

3.1 Importancia del efecto escala

Para llevar a cabo la caracterización de un material habitualmente se realizan ensayos sobre pequeñas probetas, para luego extrapolar sus propiedades al material en masa. Este proceso se realiza en todo tipo de materiales desde aceros, plásticos, materiales compuestos, etc. Cada uno con ciertas consideraciones aplicadas, por lo que habitualmente se supone que la resistencia de estos materiales no depende del tamaño de la pieza. De esta manera se asume que, aunque a escalas muy pequeñas la estructura del material no sea homogénea, a medida que crecen las escalas este sí se comporta como tal y las propiedades se homogenizan y se obtienen propiedades medias absolutas.

Este modelo es válido para ciertas propiedades del material tanto físicas como mecánicas: módulo de elasticidad, densidad, conductividad eléctrica, etc. Esto podría llevar a pensar que este modelo es válido para todas las propiedades del material. Sin embargo, la evidencia experimental apunta a que este modelo de comportamiento no se ajusta a la realidad en cuanto a la resistencia se refiere. Los fallos en los materiales tienden a iniciarse en efectos dentro del material base, que se extienden al resto de la estructura antes de producirse el fallo. Por lo que, la resistencia de un material realmente es función de los valores extremos de la parte más débil.

Un ejemplo muy claro es el de una cadena. Si una cadena está formada por una serie de eslabones extremadamente rígidos y resistentes, y uno débil y flexible, al realizar los ensayos de rigidez se observa una cadena relativamente rígida, siendo esta rigidez una media de todos los eslabones. En cambio, si se buscara la resistencia de esta cadena, aun esperando una gran resistencia por la calidad de la inmensa mayoría de eslabones, el resultado será muy malo, sólo consiguiendo la resistencia del eslabón más débil. Una experiencia muy similar del efecto escala ya la realizó Leonardo Da Vinci en el siglo XVI, comprobando que la resistencia de un cable de hierro disminuía al aumentar la longitud de este [16]. Desde esta observación numerosos artículos se han publicado sobre este tema.

Conociendo este resultado se hace muy importante el estudio y consideración de este fenómeno para conocer las propiedades reales del material al que se le está dando uso. Evitando así errores de diseño que pudiesen resultar catastróficos en estructuras diseñadas con unas propiedades sobreestimadas.

3.2 Efecto escala en materiales compuestos de fibra continua [17]

Desde hace años la industria aeronáutica está intentando minimizar los costes de ensayo para la introducción de un nuevo material, reduciendo el número de probetas y de piezas intermedias que se ensayan. Sin embargo, para poder reducir aún más el número de ensayos es necesario conocer mejor el comportamiento de los materiales compuestos. Reduciendo así la pirámide de ensayos para materiales compuestos, infiriendo más propiedades de las probetas más pequeñas y para ello es necesario cuantificar el efecto escala de los materiales compuestos.

Este comportamiento en los materiales compuestos es especialmente complejo, ya que los laminados son materiales anisótropos y distintos unos de otros en la mayoría de los casos, lo que complica enormemente el estudio. Además, las excelentes propiedades de las fibras de carbono y de vidrio vienen derivadas de este mismo fenómeno. Los materiales en masa de los que derivan estas fibras tienen propiedades mecánicas considerablemente inferiores. Gracias a este mismo fenómeno se podría esperar que, en materiales compuestos unidireccionales ensayados en la misma dirección de las fibras el efecto escala fuese nulo. Sin embargo, cómo se hace evidente por la extensa bibliografía este comportamiento esperado difiere del observado [17] [18] [19] [20].

Existen numerosos posibles causantes de este comportamiento en los materiales compuestos:

1. Defectos y consideraciones estadísticas

En primer lugar, hay que recordar que la resistencia de un material uniformemente cargado viene determinada por su parte más débil, siendo esta habitualmente el defecto más grande presente en el material. Estos defectos por lo general tienden a estar aleatoriamente distribuidos por el material, por lo tanto, cabe esperar que, a mayor volumen del material, mayor es la probabilidad de que aparezca un defecto grande. Estos defectos afectan gravemente al material, ya que su presencia afecta a la resistencia de todo el material. Una analogía muy ilustrativa de nuevo es la resistencia de una cadena. A medida que se añaden eslabones la probabilidad de que uno de ellos tenga alguna imperfección o no se haya fabricado correctamente se hace mayor, por lo que aumenta la probabilidad de fallo del conjunto completo.

Este comportamiento fue estudiado por Weibull. Este propuso una distribución estadística muy usada en la actualidad para predecir la resistencia de los materiales frágiles según su volumen:

$$P(s) = e^{-V\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m}$$

Siendo P la probabilidad que el material de estudio resista una tensión σ con un volumen V . En la ecuación anterior aparecen dos constantes, σ_0 que representa una resistencia característica del material por unidad volumétrica y m denominado Módulo de Weibull. Esta constante indica variabilidad de la resistencia del material, para valores bajos corresponde con una alta variabilidad y para valores altos una baja variabilidad entre especímenes.

Para extraer este módulo se pueden ensayar 2 volúmenes V_1 y V_2 los cuales fallarán a una tensión σ_1 y σ_2 respectivamente.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{-1/m}$$

Esta ecuación es válida siempre y cuando la geometría se escale de un espécimen a otro y la distribución de tensiones es idéntica. La teoría de Weibull estima que existe una relación entre la variabilidad entre especímenes y el efecto escala en este material, a mayor variabilidad, mayor es el efecto escala. De hecho, es posible extraer el módulo de Weibull mediante procedimientos estadísticos de un solo tamaño de probetas. Para extraer el módulo de Weibull de ensayos a diferentes escalas basta con representar los resultados en una escala logarítmica y deberían generar una línea recta con una pendiente de $-1/m$.

Estas predicciones permanecen válidas mientras el material de estudio sea frágil y el modo de fallo se mantenga constante entre los ensayos. En caso de que no se tenga en cuenta esto, los ensayos pueden arrojar diferentes valores para el módulo de Weibull para distintos tamaños.

Para los materiales frágiles el fallo se suele originar en un defecto, sin embargo, en materiales cuasifrágiles el fallo puede aparecer por un cúmulo de defectos más pequeños que al unirse forman un defecto de un tamaño efectivo mayor. Este puede provocar un fallo a un nivel de carga menor al de cada uno de los defectos individualmente. Para materiales dúctiles sin embargo el efecto del tamaño debería de ser despreciable ya que la pérdida de resistencia debida al defecto presente en el material se debería distribuir uniformemente mediante la deformación plástica, anulando así su efecto.

Sin embargo, incluso para materiales dúctiles como la resina epoxi, al aumentar el tamaño del espécimen de ensayo se observan variaciones. Aun manteniéndose la tensión de rotura independientemente del tamaño, la deformación en rotura disminuye rápidamente con el tamaño [21].

2. Microestructura del material

La microestructura de los materiales compuestos también juega un papel vital en el efecto escala de estos. La disminución de resistencia de las fibras como las de carbono o vidrio a medida que se aumenta el diámetro es un hecho bien documentado, ya descrito por Griffith en 1920 [22]. Además, la reducción de resistencia también se ve reducida, como es de esperar, a medida que aumenta la longitud de las fibras. En cuanto a la resina que actúa como matriz en los materiales compuestos también es susceptible del efecto escala, originándose daños en defectos inherentes a la estructura polimérica de la resina una vez curada.

Los materiales compuestos también pueden tener fallos en su microestructura a causa de errores en la fabricación de los preimpregnados o la infiltración de la matriz en la fibra. Algunos de estos fallos pueden ser: cúmulos locales de fibras demasiado juntas, zonas pobres de fibra, huecos, interfases delaminadas entre la fibra y la matriz, fibras rotas o mal alineadas. Este tipo de fallos también pueden aparecer al nivel del laminado. Por ejemplo, pueden aparecer grietas transversales causadas por las tensiones residuales dentro del laminado, que a tensiones mucho menores de lo esperado pueden causar delaminaciones. La generación de estas grietas depende del espesor, generando un efecto escala en este tipo de laminados. Otro tipo de errores presentes en los laminados son las microondulaciones, que pueden acelerar significativamente el fallo de estos laminados a compresión. A esta escala también pueden aparecer regiones ricas o pobres en fibra durante el curado que a su vez también pueden provocar el fallo prematuro del laminado.

Para las láminas de fibras dispuestas en una matriz, la propia estructura ya tiene ondulaciones intrínsecas que, aparte de reducir su resistencia a la compresión, pueden atrapar burbujas durante el proceso de fabricación o ser el punto de inicio de grietas. En cuanto a las fibras tejidas, estas tienen defectos por el propio método de fabricación. Estos efectos pueden dañar las fibras, generar ondulaciones o generar puntos de iniciación para las grietas.

3. Extremos libres

En los laminados con bordes libres aparecen tensiones interlaminares muy altas que pueden causar el fallo del laminado. Este fenómeno estudiado por Pipes y Pagano [23] mediante el método de las diferencias finitas arrojó que este fenómeno no solo depende de las orientaciones de los laminados, sino también del espesor de estos. En la Figura 3-1 se muestra la variación de dichas tensiones en el espesor del laminado.

Las tensiones generadas en los extremos pueden causar fallos a causa de los extremos libres, fallos que pueden ser difíciles de distinguir de aquellos generados por un aumento del volumen ensayado. Por ejemplo, si se realiza una serie de ensayos donde en cada probeta se aumenta las 3 dimensiones por igual la reducción puede atribuirse a un incremento del volumen, aunque sea principalmente causado por el incremento del espesor del laminado.

Otro efecto acusado a los bordes libres son las delaminaciones o roturas iniciadas en el daño generado durante el corte del laminado. Este efecto puede aparecer incluso en laminados unidireccionales, cuando sus fibras no están perfectamente alineadas.

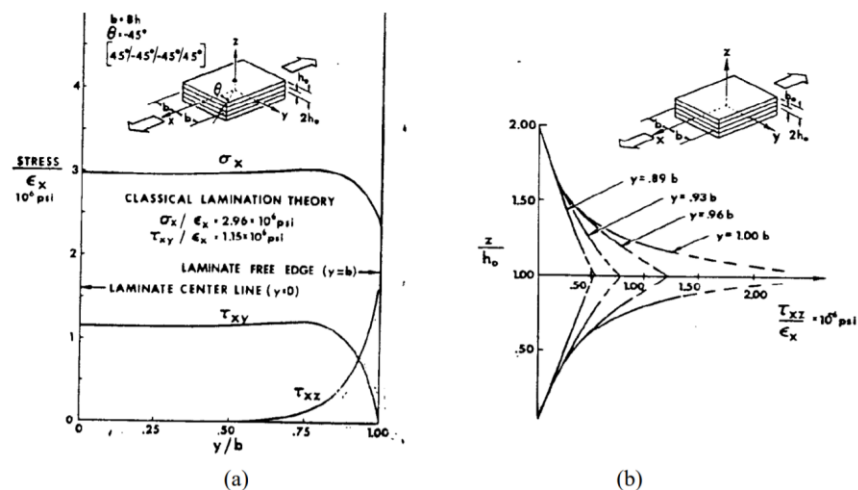


Figura 3-1. a) Tensiones en la interfase ($z = h_0$), b) Variación de σ_{xz} en el espesor ($y = b$) [30]

4. Gradiente de tensiones

En algunos ensayos el campo de tensiones no es constante, un ejemplo de los más usados es el ensayo de flexión. En este tipo de ensayos los resultados ofrecen una resistencia mayor a los equivalentes de tracción y compresión. Esto lleva a cuestionar si este efecto es a causa de un efecto escala, al ser mucho menor el volumen cargado, o si es a causa de un gradiente no uniforme de tensiones dentro de la probeta.

La teoría de Weibull indica que la resistencia en el ensayo de flexión debía ser mayor que el de tracción. Para materiales frágiles estos resultados se adaptan a la teoría, sin embargo, para materiales compuestos es posible que los efectos del gradiente de tensiones sean dominantes frente al efecto escala en los ensayos de flexión. En compresión, el efecto del gradiente de tensiones puede ser vital una vez aparezca micro pandeos en la zona con mayor compresión, reduciendo la compresión máxima que es capaz de soportar una probeta.

5. Fabricación y preparación de los especímenes

La incertidumbre introducida durante la fabricación y acabado de probetas y especímenes a ensayar es un factor fundamental a tener en cuenta. Un ejemplo de este aspecto es el aumento de la resistencia observada si se pulen los bordes de los laminados a ensayar. Otro factor a tener en cuenta es que, en los casos que se necesita un mecanizado, la diferencia del área mecanizada entre una probeta y otra probablemente será la causante de la aparición de un efecto escala entre ellas.

Aunque el proceso de fabricación sea idéntico entre una probeta y otra, pueden aparecer efectos de escala inherentes al proceso de fabricación. Por ejemplo, diferentes ratios de volumen y área pueden afectar a la absorción de agua, desplazamientos de vacíos y burbujas de aire dentro del material. Otro problema que surge de la diferencia entre el ratio área/volumen es su influencia en los ciclos de curado. A medida que se aumenta el volumen del laminado aparecen gradientes de temperaturas mayores y durante más tiempo, lo que puede afectar significativamente en el grado de curado entre un laminado y otro.

6. Consideraciones en los ensayos

Hay una serie de consideraciones vitales a la hora de realizar ensayos para observar efectos de escala en un material o configuración. Primero, a la hora de medir las deformaciones es de vital importancia que, en caso de usar galgas extensométricas, han de tener unas dimensiones considerablemente superiores al tamaño de la microestructura interior. Por ejemplo, hay algunos tipos de fibras de carbono tejidas con un tamaño de celda de hasta 25 mm, lo que puede falsear los resultados si no se usa la galga correcta. Otro error similar que se puede dar en probetas pequeñas es medir las deformaciones muy cerca de los puntos de carga, lo que una vez más arrojaría valores no representativos de las deformaciones de esta probeta.

En los ensayos, aun usando el mismo método para las distintas probetas, puede aparecer un efecto escala que no tenga ninguna relación con el volumen. Por ejemplo, los especímenes más gruesos pueden dar resistencias menores por el aumento del concentrador de tensiones en los externos de los tacos. Al tener la misma superficie y mayor espesor, la carga que se transmite por los tacos es mayor, aumentando así el concentrador de tensiones en los extremos. Otro aspecto muy a tener en cuenta son las deficiencias en el método de ensayo. A causa de este tipo de fallos se podrían observar o denegar presuntos efectos de escala por errores en el método de ensayo. Algunos ejemplos de estos son: la mala alineación de las probetas más pequeñas, modos fallos no deseables en las probetas, mal agarre de las mordazas etc. Por ello se hace vital escalar toda la geometría de la probeta a ensayar, desde el material compuesto hasta los tacos y utillaje.

Capítulo 4: IMPRESORA MARK TWO®

4.1 Funcionamiento de la impresora Mark Two®

La impresora de fabricación aditiva Mark Two® fabricada por la empresa estadounidense Markforged® surge como una sucesora natural a la impresora Mark One® fabricada por esta misma empresa. Esta impresora es capaz de imprimir materiales compuestos de fibra continua gracias a sus 2 cabezales de extrusión, uno para el plástico y otro para el filamento con fibra continua. La impresión de una probeta en esta impresora se puede observar en la Figura 4-1.

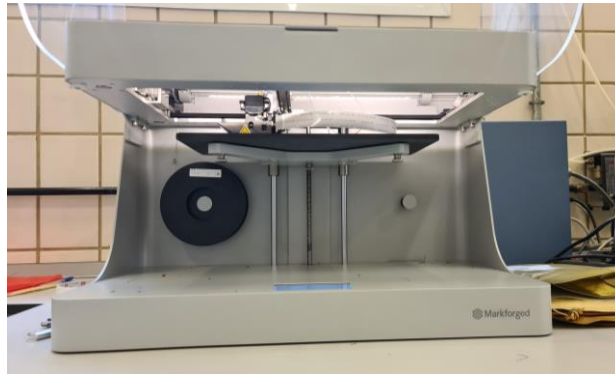


Figura 4-1. Impresora Mark Two® imprimiendo una probeta

Antes de hacer uso de la impresora se hace imperativo leer el manual dado por la empresa. En él se enseña con detalle cómo hacer un buen uso de la impresora, desde el encendido y sus partes más importantes hasta cómo hacer una calibración en profundidad de esta [24]. Además, a medida que se van sucediendo los procesos más comunes en la impresora, esta va indicando en su pantalla que hay que hacer en cada momento, facilitando enormemente la mayoría de las operaciones. Esta pantalla se puede ver en la Figura 4-2.

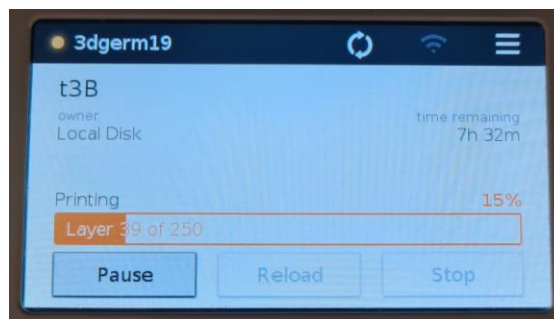


Figura 4-2. Pantalla de la impresora Mark Two®

También hay que destacar que la empresa Markforged® dispone de un servicio de atención al cliente para cualquier duda o error que se pudiese dar durante el uso de la impresora.

A continuación, hay que destacar una serie de características inherentes a esta impresora antes de comenzar su uso una vez leído el manual.

1.- Si no realizamos una carga del material medida, introduciendo el peso total de la bobina cuando cargamos tanto el plástico como la fibra antes de comenzar a imprimir y se acaba la fibra o el plástico, la impresora seguirá imprimiendo hasta acabar. Esto es de especial importancia con impresiones con fibra, ya que esta se encuentra encapsulada dentro del Onyx y no es visible una vez se concluye la impresión.

2.- Si se quiere imprimir una pieza de grandes dimensiones es importante comprobar que la impresora imprime la primera capa de Onyx correctamente, desde el centro hasta los extremos. Es muy común que, aún habiendo calibrado la impresora siguiendo las instrucciones dadas por el fabricante, en los bordes no se imprima suficiente material porque el cabezal está demasiado bajo o viceversa. Si ocurre esto será necesario ajustar la cama para esa impresión en específico.

3.- Una vez se imprime con Onyx la impresora no es apta para imprimir con nylon a menos que se sustituyan los tubos y boquillas de extrusión. Según Markforged[®] esto es debido al desgaste producido por el Onyx, que una vez se usa desgasta en mayor medida los elementos de impresión.

4.1.1 Mejoras generacionales

El cambio generacional de una impresora a otra se hace obvio, siendo la Mark Two[®] una impresora más refinada en todos sus aspectos. Con esa impresora ya se permite el giro mucho más cerrado de las fibras de carbono, haciendo posible el diseño de formas mucho más complejas e interesantes con ésta. Un ejemplo es la impresión de probetas de 0° directamente desde la impresora. En la Figura 4-3 podemos observar el antiguo proceso que se necesitaba para imprimir este tipo de probetas.

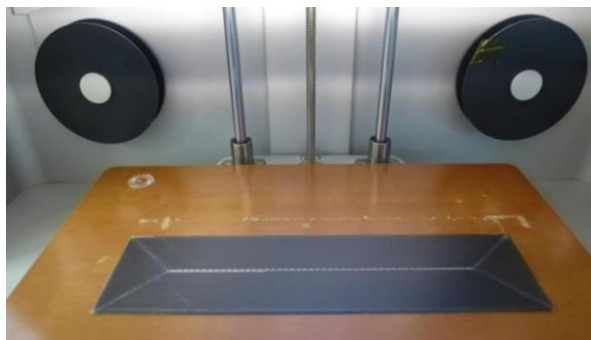


Figura 4-3. Proceso de impresión de probetas de fibra de carbono en la impresora Mark One[®] [23]

En cuanto a los acabados de la nueva impresora son claramente superiores a la antigua. Los bordes son más suaves en todos sus acabados y hay menos riesgos tanto de deformaciones residuales como de errores de impresión sistemáticos [25], [26]. Esta impresora ya no requiere de espátula para limpiar los cabezales durante la impresión, los tubos están mejor diseñados para evitar atascos y las piezas se advierten más pulidas.

Otro factor en el que se observa una enorme mejora generacional es en la predicción de los tiempos de impresión. En esta impresora, a diferencia de la Mark One[®], los tiempos de impresión son precisos. Las diferencias entre el tiempo que el programa estima al real suele existir una desviación de menos de 5%, lo que hace mucho más fácil ajustar los horarios para la serie de piezas que se desea imprimir.

4.2 Características técnicas de la Impresora

A continuación, en la Tabla 2 se muestran las principales características técnicas de la impresora Mark Two®.

Tabla 2. Principales características técnicas de la impresora Mark Two®

Proceso de fabricación	Fused Filament Fabrication Continuous Filament Fabrication
Volumen de fabricación	584 × 330 × 355 mm
Peso de la impresora	16 Kg
Cama de impresión	Acoplamiento cinemático
Alimentación	100-240 V 150 W (Max)
Número de extrusores	2
Altura de capas	100 - 200 µm
Patrón de relleno	Sólido, triangular, hexagonal, cuadrangular
Tamaño de la impresora	58,42 × 33,02 × 35,56 cm
Materiales de fabricación de la impresora	Aluminio 6061 T6 y ABS
Conectividad	USB, Ethernet, Wifi
Módulo de Wifi	Banda de operación 2.4 GHz Wi-Fi Estandar 802.11 b/g/n
Software	Eiger Cloud

4.3 Materiales de impresión

Los materiales con los que dispone la impresora Mark Two® se pueden dividir en dos categorías:

4.3.1 Plástico que actúa como matriz.

Este es un termoplástico con base de nylon que se extruye a 260 °C desde el cabezal preparado para esto. Estos materiales se comercializan en rollos de 800 cm³ los cuales hay que introducir en una caja sellada la cual evita tanto la entrada de humedad como la difusión del agua a través de las paredes. Este requerimiento es necesario ya que el nylon es un material hidrófilo y una vez se humedecen altera las propiedades del material. Este aspecto es especialmente importante antes de la impresión, ya que provoca errores de impresión que se verán más adelante. Es por esto por lo que es de vital importancia cerrar bien la caja una vez se introduzca el material y revisar el paquete de embalaje una vez se ha comprado y en el caso que tenga algún agujero devolverlo inmediatamente. Actualmente se dispone de dos principales opciones diferentes:

Nylon: Tiene un color blanco con un acabado suave. Su rigidez es baja, con un alargamiento en rotura del 150 %. Su resistencia a la temperatura también es considerablemente menor que la del resto de opciones disponibles. En la Figura 4-4 podemos observar una bobina de dicho material.



Figura 4-4. Bobina de nylon en su caja pelícano

Onyx: Polímero de base de nylon con partículas de carbono con un acabado negro. Este material tiene una precisión dimensional una vez impreso mayor que la del nylon, así como una rigidez considerablemente superior. Markforged® ha añadido recientemente a su catálogo 2 nuevos tipos de Onyx. Onyx Fr, el cual gracias a los aditivos añadidos se comporta como un retardante de llama, reduciendo así el riesgo de incendio en ambientes donde esto sea importante sin perder propiedades mecánicas. La última de las adiciones ha sido Onyx ESD, esta variante de Onyx tiene unas propiedades mecánicas tanto de rigidez como de resistencia considerablemente superiores a las del Onyx. En la Figura 4-5 podemos observar una bobina de dicho material.



Figura 4-5. Bobina de Onyx en su caja pelícano

4.3.2 Fibras de refuerzo.

Estas fibras rellenan partes de la pieza impresa para aumentar su rigidez y resistencia. Este patrón de llenado y cómo controlarlo se verá en el siguiente apartado. Las fibras se comercializan en rollos de 50 y 150 cm³ y en este caso no es necesario almacenarlas en una caja sellada. Las fibras en los rollos vienen preimpregnadas en un termoplástico formando filamentos para que la impresora pueda extruirlas y estas se adhieran a la pieza que se esté imprimiendo. Estos hilos son especialmente frágiles y es importante tratarlos con cuidado. Las fibras de las que actualmente se disponen para la impresora Mark Two® son las siguientes:

Fibra de vidrio: La fibra de vidrio convencional se establece como la fibra más básica de las opciones que ofrece Markforged®. Esta aporta una rigidez y resistencia muy superiores a una pieza que carezca de cualquier tipo de refuerzo. Por contraparte, como se verá más adelante, las piezas con una cantidad de refuerzo considerable de este tipo de fibras tienden a tener unas deformaciones residuales importantes. En la Figura 4-6 se puede observar una bobina de este material.

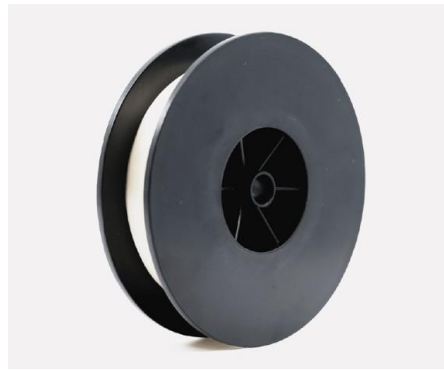


Figura 4-6. Bobina de 50 cm^3 fibra de vidrio [29]

Fibra de vidrio de alta resistencia y temperatura: Este tipo de fibra busca aumentar la resistencia a la tracción de la fibra de vidrio y la rigidez de esta a altas temperaturas. Uno de los principales objetivos de este tipo de fibra es mejorar el comportamiento de los moldes impresos para autoclave. Esta fibra tiene una apariencia muy similar a la fibra de vidrio.

Fibra de carbono: La fibra de carbono es la mejor opción en cuanto a sus propiedades mecánicas de rigidez y resistencia. También, como se verá en el siguiente capítulo las piezas fabricadas con fibra de carbono tienen una estabilidad dimensional muy superior a las fabricadas con fibras de vidrio. En la Figura 4-7 se puede ver una bobina de 50 cm^3 de fibra de carbono.



Figura 4-7. Bobina de 50 cm^3 de fibra de carbono [29]

Fibra de Kevlar®: Estas fibras de aramida aparte de tener una resistencia superior a las de fibras de vidrio, dotan de una tenacidad a la pieza muy superior al del resto de fibras. En la Figura 4-8 se puede ver una bobina de este material.

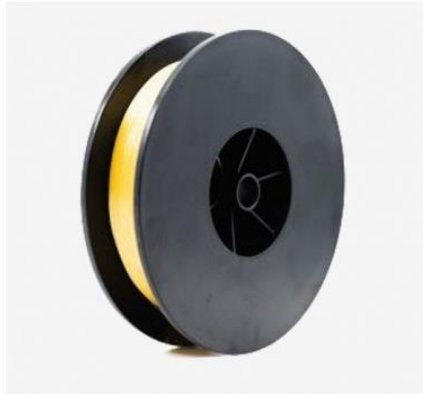


Figura 4-8. Bobina de 50 cm³ de Kevlar® [29]

A continuación, se muestra la Tabla 3 con las propiedades dadas por la empresa Markforged®. En este trabajo se va a validar los datos proporcionados por la compañía, tanto de resistencia como de rigidez de los materiales puestos a ensayo. Cabe destacar los valores dados por la empresa para la rigidez de sus fibras, siento estos valores ~ 5 - 10 veces inferiores a los que se deberían esperar de un material similar.

Tabla 3. Propiedades de los materiales descritos ofrecidas por Markforged®

Propiedad	Nylon	Onyx	F. Vidrio	F. Carbono	Kevlar®	HSHT. F.G
E11 [GPa]	1,7	2,4	21	60	27	21
Xt [MPa]	51	40	590	800	610	600
σ_r [MPa]	36	37	-	-	-	-
ϵ_r [%]	50	25	3,8	1,5	2,7	3,9
Yt [MPa]	-	-	180	420	130	216
ϵ_r [%]	-	-	-	0,7	1,5	0,8
Compresión						
Tenacidad* [J/m]	110	330	2600	960	2000	3100
Densidad [g/cm ³]	1,1	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5

*Ensayo de Izod con hendidura

En la tabla las celdas con “-” son valores que no otorga la empresa.

4.4 Modelado e Impresión

Para imprimir en la impresora Mark Two® hay que seguir una serie de pasos. El primero es el modelado de las piezas en un programa de diseño 3D como CATIA o SolidWorks, a continuación, procesarlo en Eiger para introducir las características de impresión y por último extraer el archivo de impresión para fabricarlo en la impresora, ya sea vía internet o mediante USB.

Antes de comenzar con la descripción del programa es importante destacar que el programa permite seleccionar múltiples configuraciones tanto de posicionamiento de fibra, material y relleno, pero no permite una colocación exacta ni de las fibras ni del polímero. De esta manera se hace necesario un estudio de las opciones que este programa nos ofrece y seleccionar la que más se parezca al diseño del material compuesto que se quiera fabricar. Este hecho facilita enormemente el trabajo a los usuarios con conocimientos limitados sobre materiales compuestos e impresoras 3D, ya que hace difícil seleccionar una combinación de propiedades que pueda afectar negativamente a la pieza.

Sin embargo, a medida que se tiene más conocimiento sobre estos materiales e impresoras las limitaciones de diseño pueden afectar negativamente al potencial de desarrollo de una pieza. Este programa no permite ajustar ni la velocidad de extrusión del cabezal ni su temperatura. Tampoco permite eliminar las capas exteriores de Nylon u Onyx para imprimir solo con fibra ni controlar el posicionamiento exacto de esta. Estas restricciones suelen acabar provocando un efecto contrario a su objetivo, ya que obligan a usar elementos del programa que en primera instancia no fueron diseñados para una tarea en concreto. Transformarlos para obtener un resultado que, con un control a un nivel más bajo del programa, hubiese sido más rápido, sencillo y preciso.

4.4.1 Modelado 3D con CATIA

El primer paso para poder imprimir con la impresora Mark Two® es obtener el modelo 3D en un archivo .stl. En este trabajo se ha usado el programa de diseño CATIA para modelar todas las probetas. Este proceso es el menos complejo y el más corto del proceso de fabricación por la simplicidad de las figuras diseñadas. En la Figura 4-9 se puede ver una probeta en CATIA durante el proceso de diseño.

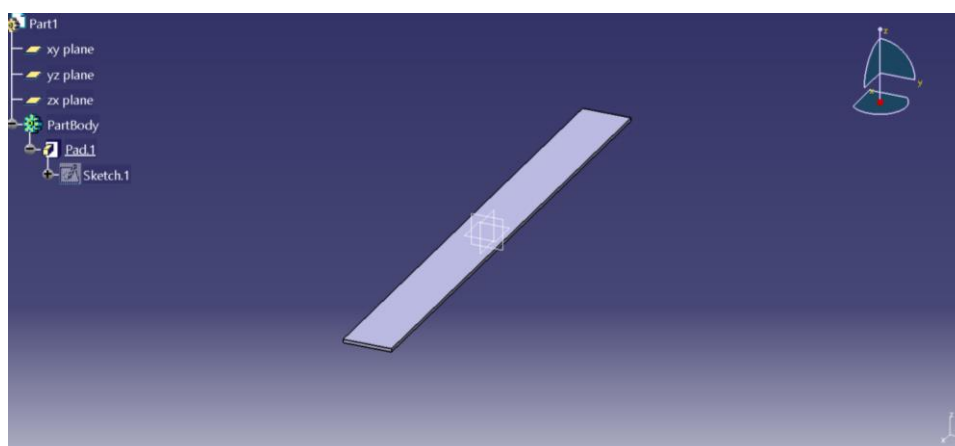


Figura 4-9. Probeta diseñada en CATIA

Durante el diseño es importante tener en cuenta que la altura de la pieza solo puede ser múltiplos del espesor de impresión. Este espesor puede ser de 0,1 a 0,2 mm, dependiendo de la impresión que se esté realizando.

4.4.2 Impresión con Eiger

Para procesar los archivos 3D e imprimir en la impresora Mark Two® de la empresa Markforged® dispone del programa on-line Eiger. Este programa es ofrecido por parte de la empresa de manera gratuita, con un usuario y contraseña para poder hacer uso de la impresora [27].

4.4.2.1 Menús iniciales

Una vez se inicia sesión se verá la siguiente pantalla de la Figura 4-10.

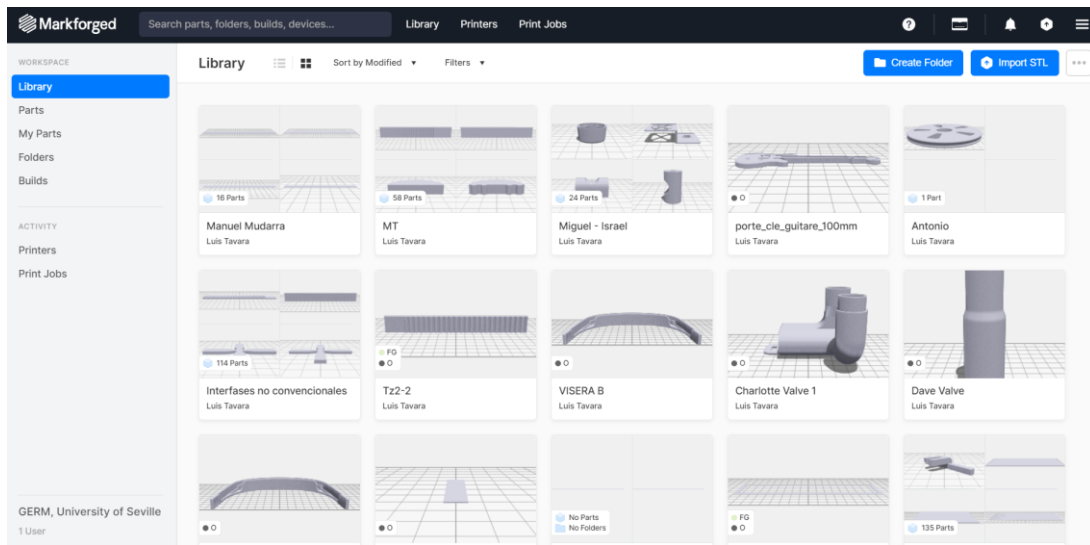


Figura 4-10. Menú inicial de Eiger

En ella se pueden ver las carpetas con las piezas ya diseñadas dentro del programa. Desde este menú de inicio podemos acceder a la mayoría de las opciones. A continuación, se va a hacer un repaso de las opciones dentro de los menús más importantes durante la utilización de la impresora Mark Two®

Comenzando por arriba en el centro podemos ver *Library*, este es el menú que se puede ver en la Figura 4-10, donde aparecen todas las carpetas con las piezas que se han diseñado. Justo a la derecha se encuentra *Printers*, en la Figura 4-11 se puede ver este menú. Desde este menú es posible controlar todas las impresoras de MarkForged asociadas a la cuenta de Eiger. Algunas de los datos que se muestran son: el estado actual de la impresora, la cola de impresión y la opción de alterarla, así como las versiones de software de la impresora. Cabe destacar que para poder hacer un uso pleno de estas funcionalidades es necesario conectar la impresora a internet, ya sea mediante Wifi o ethernet.

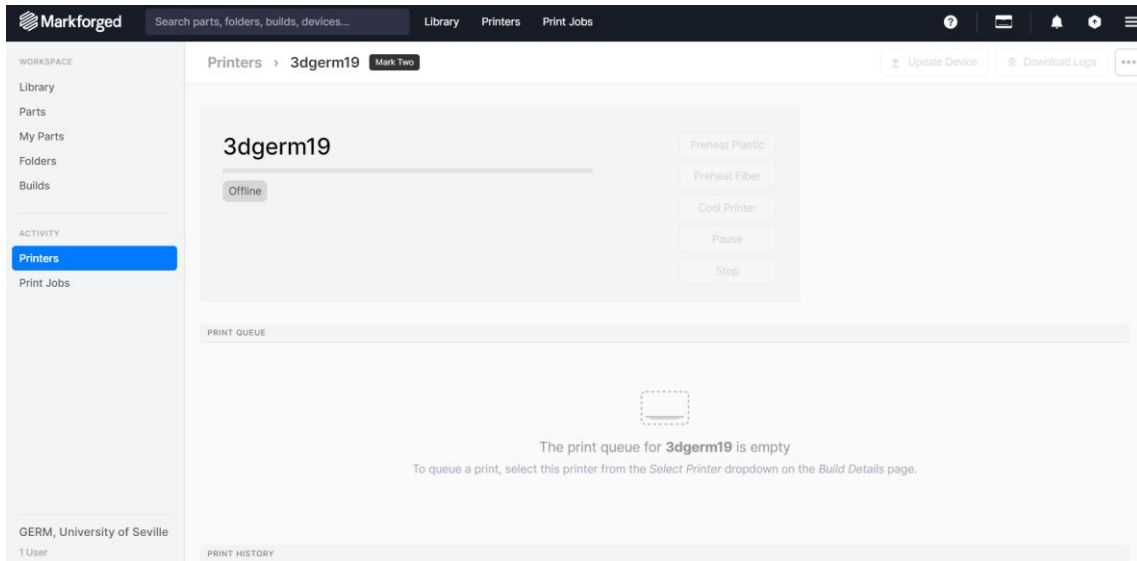


Figura 4-11. Menú de impresoras de Eiger

Más a la derecha se encuentra *Print Jobs*, en este apartado se encuentran todas las piezas y modificaciones que se han realizado de estas en el usuario actual. Estas se pueden ordenar por material, si se ha impreso finalmente, la impresora, etc.

Markforged® también dispone de un pequeño manual en el cual se explican algunas ideas de diseño y el comportamiento general de la impresora ante piezas de material compuesto. Se recomienda encarecidamente su lectura antes de comenzar a usar el programa para evitar errores no deseados y facilitar la iniciación en la impresión [28].

4.4.2.2 Proceso de configuración: Part View

Cuando se haya diseñado la pieza a imprimir se ha de subir el archivo .stl a Eiger usando el botón para ello que se ve en la Figura 4-12 .



Figura 4-12. Botón de importar de Eiger

Una vez subido, el programa entrará en el menú de edición de la pieza. Este menú es de gran importancia, ya que es dónde se le atribuirán a la pieza todas las propiedades que luego se verán reflejadas en la impresión. A continuación, en la Figura 4-13 se muestra un ejemplo de este menú con una de las probetas que se estudiarán.

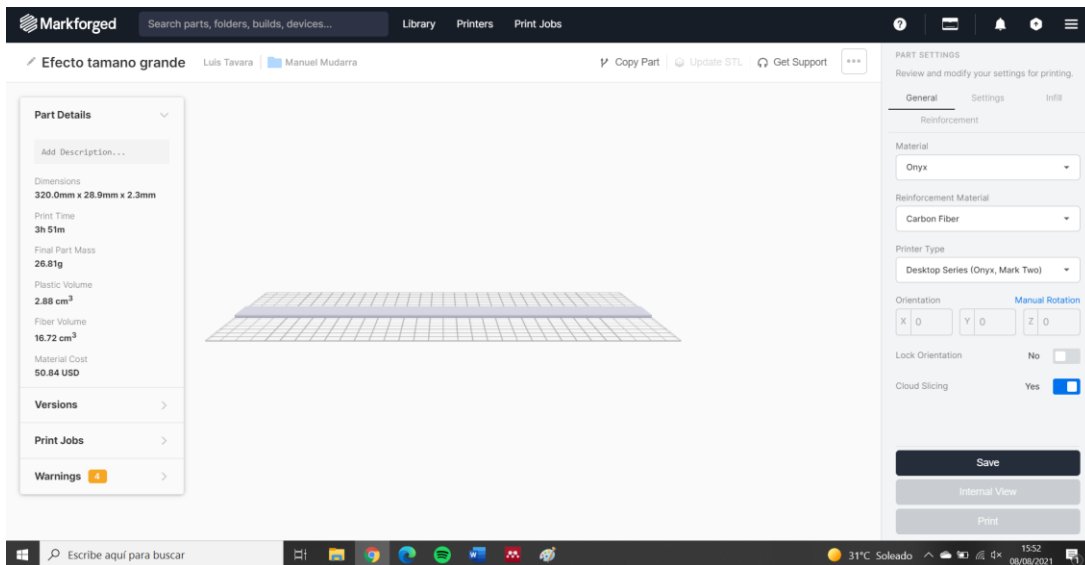
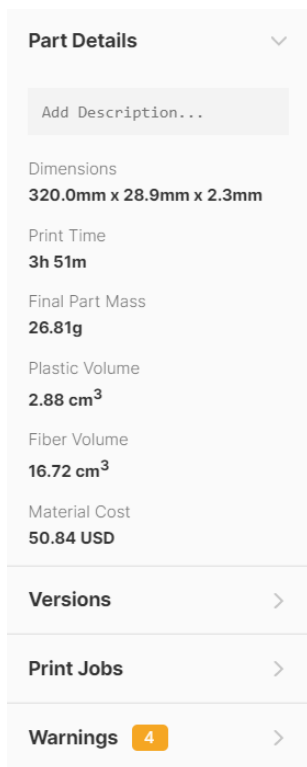


Figura 4-13. Menú de edición de Eiger

Los aspectos más importantes de este menú se ven en las columnas de los laterales:



Como se puede ver en la Figura 4-14, en este menú se muestran los detalles de la pieza en la que se está trabajando. El primer apartado nos da las dimensiones de la pieza según el eje x, y, z en mm. Este tamaño, tiene una resolución de 0,1 mm. Si se carga un archivo .stl con unas dimensiones distintas el programa redondea las dimensiones automáticamente hasta que sean múltiplos de 0,1.

El segundo elemento es el tiempo de impresión estimado. Este, como ya se determinó al principio del capítulo es razonablemente exacto y resulta una buena ayuda para ajustar las impresiones.

A continuación, se indica tanto el peso final de la pieza como el volumen de plástico y fibra que se va a usar en la impresión. Esto es extremadamente útil para poder ajustar los rollos de material que se van a usar.

La siguiente información es el coste estimado de la pieza. Todas las piezas al establecer la cantidad y tipo de matriz y fibra se le asigna un coste estimado según el precio recomendado de los materiales por Markforged®. Este elemento es útil para controlar los costes de producción y sobre todo si se quiere realizar un uso comercial de la máquina, dando un precio base para cada impresión de una manera fácil y rápida.

En Versions se tiene un registro de todos los cambios realizado a la pieza.

En Print Jobs se almacena un registro de todas las veces que se ha impreso esa misma pieza.

Figura 4-14. Columna derecha del menú de edición

Por último, pueden aparecer 2 ventanas más: Warning y Error. En el apartado de Warning se indican aspectos de la pieza que se está diseñado que pueden afectar a su acabado, propiedades o que durante la impresión va a ser necesario la manipulación de la máquina como por ejemplo cambiar el material. Estos avisos solo son recomendaciones y se puede imprimir aun cuando estos existan. Si aparece un apartado de Error es indicativo de un fallo en la pieza que hace imposible su impresión. Uno de los errores más comunes es que la pieza se salga

de los límites de la cama de impresión, por lo que no se podrá imprimir.

En la columna de la derecha se concentran la mayoría de los parámetros a controlar de la impresora. En esta se encuentran 4 menús distintos.

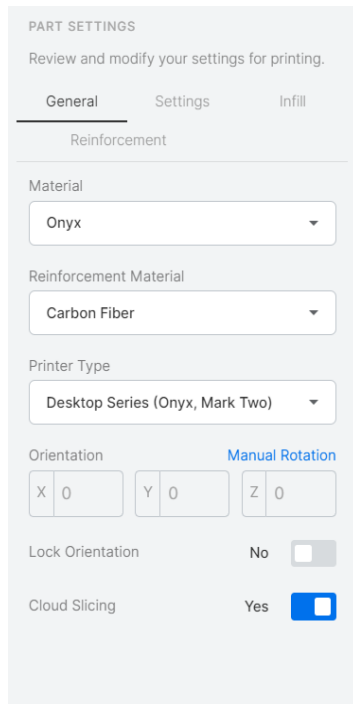


Figura 4-15. Menú de Part Settings General

El primero: *General*, que se puede ver en la Figura 4-15.

En este se puede elegir en primer lugar el plástico de la matriz entre las 4 opciones posibles que ofrece Markforged®: Nylon, Onyx, Onyx Fr y Onyx ESD. Dentro de este menú también aparecen los materiales para las impresoras de materiales metálicos de Markforged®, pero no es posible seleccionarlos en esta impresora.

A continuación, se muestran las opciones de refuerzo, en las que se puede elegir: no añadir ninguno, fibra de carbono, fibra de vidrio, fibra de vidrio HSHT, o Kevlar®. En el caso de no elegir ningún refuerzo el menú *reinforcement* permanecerá deshabilitado.

El siguiente paso es seleccionar el modelo de impresora que se va a usar, en este caso Mark Two®.

En el siguiente apartado se permite la orientación de la pieza dentro de la cama de impresión. Para esto se permite una rotación manual para colocarla de la manera óptima. Hay que recordar que para elegir esta orientación es muy importante maximizar la superficie de contacto con la cama de impresión y que las fibras estén orientadas correctamente. También se permite bloquear esta orientación con *Lock Orientation* para evitar un movimiento accidental de la pieza.

Por último, se encuentra la opción *Cloud Slicing*, dónde se permite elegir dónde se va a realizar el procesamiento de la pieza, para trazar el camino de impresión. A menos que la pieza sea extremadamente grande, lo más recomendable es dejar *Cloud Slicing* por defecto.

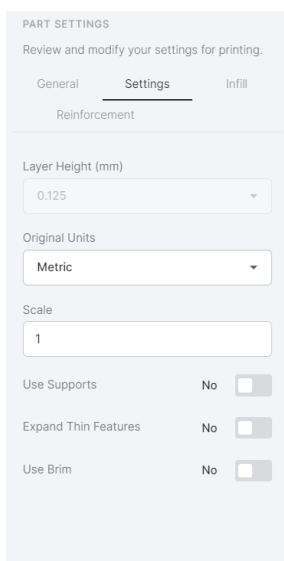


Figura 4-16: Menú de Part Settings Settings

El segundo menú: *Settings*, se puede ver en la Figura 4-16.

La primera opción de *layer height* permite controlar el espesor de la capa de extrusión durante la impresión. Este espesor se puede variar entre 0,1 y 0,2 mm en el caso que no exista refuerzo. Si se le añade cualquier tipo de refuerzo el espesor de las capas queda automáticamente fijado. En la Tabla 4 se muestran los distintos espesores según el tipo de fibra.

En esta sección también se puede elegir las unidades y la escala en la que se trabajaba en el programa dónde se ha extraído el diseño de la pieza para imprimir la pieza acorde al diseño realizado.

Tabla 4. Espesor de las capas según el tipo de refuerzo

Material	Espesor de capa [mm]
F. Carbono	0.125
F. Vidrio	0.1
Kevlar®	0.1

Al final en este menú hay tres opciones de las que se puede elegir:

Use supports: En caso de seleccionarlo el programa añade un elemento de soporte en las piezas que tienen voladizos o tienen una esbeltez considerable, evitando así que la pieza colapse durante la impresión.

Expand Thin Features: En caso de que la pieza a imprimir no se haya diseñado para que sea impresa en esta impresora 3D es posible que algunos de los bordes o detalles sean demasiado finos, resultando en un posible acabado poco deseable. Esta opción permite agrandar estos detalles automáticamente mejorando potencialmente los acabados y la integridad estructural de la pieza.

Use Brim: Esta opción añade una base de Onyx o Nylon a la pieza para mejorar su estabilidad. Este brim es recomendable cuando la superficie de contacto con la cama no es muy buena o si la pieza tiende a tener deformaciones residuales muy acusadas.

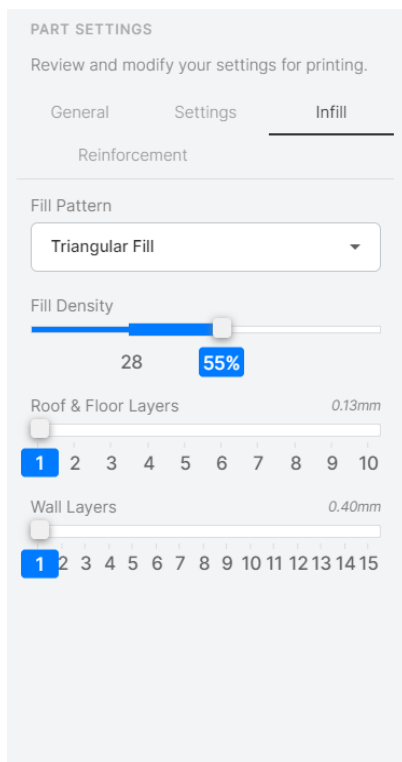


Figura 4-17: Menú de Part Settings Infill

El tercer menú: *Infill*, se puede ver en la Figura 4-17.

La impresora Mark Two®, como la mayoría de impresoras 3D que se vieron en el capítulo 1, no suelen imprimir piezas sólidas al 100 % de plásticos. A medida que se aumenta el porcentaje aumenta la resistencia mecánica de la pieza pero se incrementa el tiempo, el coste y el peso de la pieza. La impresora Mark Two® dispone de 4 patrones posibles de llenado que se muestran en la Tabla 5. Además, en las, Figura 4-20, Figura 4-19 y Figura 4-18, se muestra una misma pieza con 3 patrones de relleno distintos.

Tabla 5. Patrones de llenado y su rango de densidades

Patrón	Volumen de llenado [%]
Triangular	28 - 55
Hexagonal	28 - 60
Rectangular	0 - 92
Sólido	100

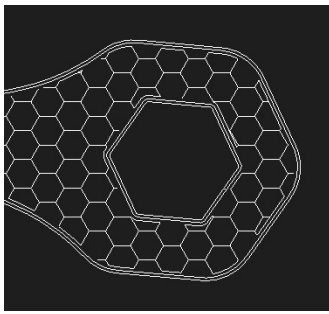


Figura 4-20. Relleno Hexagonal [27]

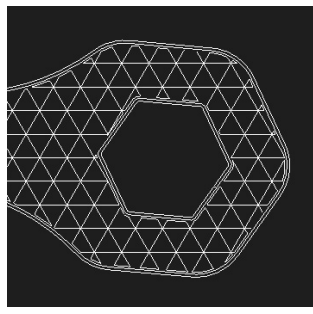


Figura 4-19. Relleno triangular [27]

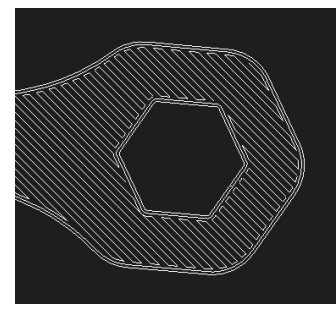


Figura 4-18. Relleno Sólido [27]

A continuación, en el menú, se encuentran la selección de capas de pared y superficie. Todas las piezas que se fabrican con una impresora Mark Two[®] tienen al menos una capa de superficie y una de muro. Estas capas están seleccionadas predeterminadamente para ser 4 de superficie y 2 de muro, pero se pueden reducir a 1 y 1. En el caso que se reduzcan del número predeterminado, aparecerá en Eiger un Warning avisando que el acabado superficial se puede ver afectado.

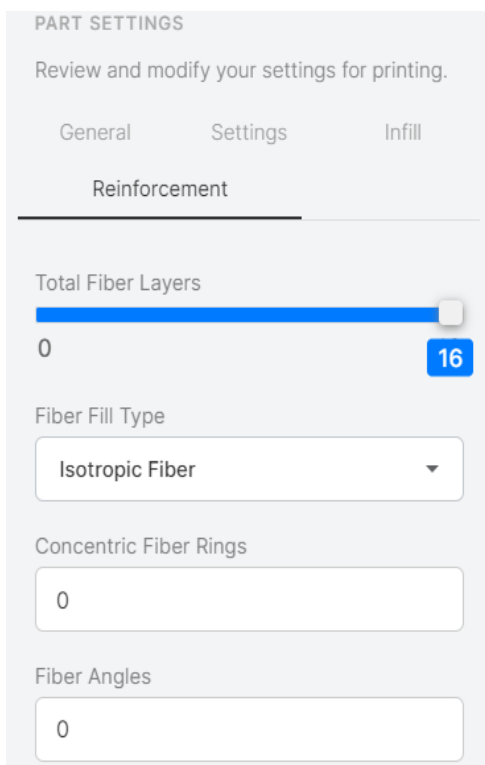


Figura 4-21. Menú de refuerzos

El último menú: *Reinforcement*

En este menú que se puede ver en la Figura 4-21 se permite diseñar el patrón de refuerzo de la fibra del material compuesto dentro de la pieza a imprimir.

La primera selección es el número de capas de la pieza que se quiere que tengan refuerzo. Se puede seleccionar solo una parte de la pieza si se estima que en el resto no será necesaria tanta resistencia, reduciendo así el coste de la pieza.

A continuación, se puede elegir entre 2 tipos de patrón de relleno de las fibras.

El primero es **Isotropic Fiber**. Este es el patrón de llenado rellena completamente la pieza con un patrón por lámina típico de un material compuesto clásico.

Si se selecciona esta opción el programa también permite añadir anillos exteriores de fibra antes de comenzar con el patrón interior como se ve en la Figura 4-22. En caso de seleccionar 0 en este apartado, la estructura interior de las láminas tendrá un comportamiento parecido al de una lámina de material compuesto tradicional.

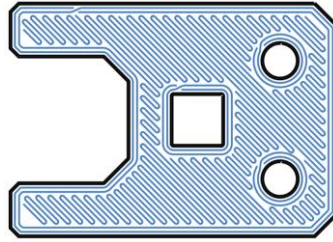


Figura 4-22. Pieza con Isotropic Fiber [28]

Después se selecciona el patrón del laminado que se va a imprimir en la pieza. Para seleccionarlo hay que escribir el ángulo de la fibra respecto al eje x, y en el caso que se quiera que se tengan más de 1 dirección se separan los números con una coma. Este patrón se repetirá en orden hasta que se acaben las láminas de la pieza.

Ejemplo de laminados de 8 capas:

Laminado unidireccional de 0° : 0

Laminado de $\pm 45^\circ$ simétrico: 45, -45, 45, -45, 45, -45, 45

En el caso que se escriba 45, -45 el programa repetirá 45, -45, 45, -45 hasta acabar todas las capas

La segunda opción disponible es **Concentric Fiber**. En el caso de elegir esta opción el programa nos dará 3 opciones para este tipo de refuerzo:

All Walls: Refuerza todas las paredes interiores y exteriores con el número de anillos especificado, cómo se muestra en la Figura 4-23.

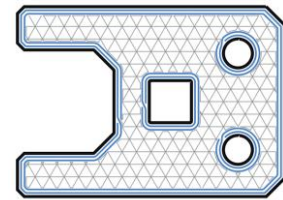


Figura 4-23. Pieza con refuerzo de *All Walls* [28]

Outer Shell Only: Solo refuerza el perímetro exterior de la pieza, cómo se muestra en la Figura 4-24.

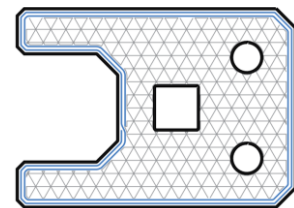


Figura 4-24. Pieza con refuerzo de *Outer Shell Only* [28]

Inner Shell only: Solo refuerza los muros interiores de la pieza, cómo se muestra en la Figura 4-25.

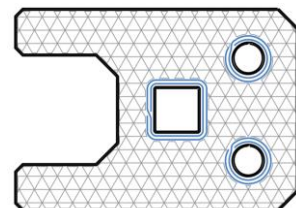


Figura 4-25. Pieza con refuerzo de *Inner Shell Only* [28]

Una vez ya se haya acabado el diseño de la pieza se procede a guardar la pieza y trazar así el relleno interior, el camino de la fibra y las características que se vieron antes en la columna de la izquierda.

4.4.2.3 Proceso de configuración: Internal View

Antes de proceder a la impresión de la pieza es de vital importancia entrar en el menú de previsualización de la pieza. Este menú permite una visualización completa de la pieza con todas sus capas, patrones, refuerzos, muros y capas superficiales además permitir editar parámetros extra de impresión. En la Figura 4-26 se puede observar cómo es dicho menú.

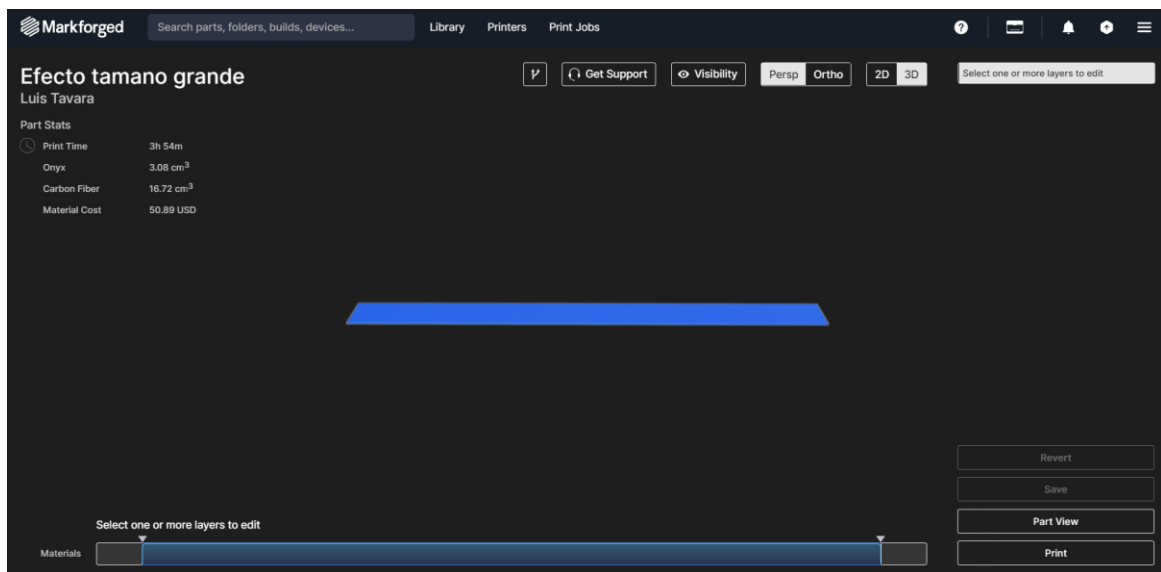


Figura 4-26. Menú de Internal View de una probeta

En el menú de Internal View tenemos abajo la barra de impresión de la probeta. Aquí se muestran de manera horizontal todas las capas de la pieza a imprimir. Esta tiene un código de colores para mostrar con que materiales se está imprimiendo:

- Blanco: Nylon u Onyx sin refuerzo.
- Azul: capa con refuerzo de fibra de carbono.
- Amarillo claro: capa con refuerzo de fibra de vidrio.
- Amarillo oscuro: capa con refuerzo de fibra de *Kevlar*[®].
- Amarillo anaranjado: capa con refuerzo de fibra de vidrio HSHT

Part Stats (up to layer 6)	
Print Time	1h 27m / 3h 54m
Onyx	1.34 / 3.08 cm ³
Carbon Fiber	5.22 / 16.72 cm ³
Material Cost	15.99 / 50.89 USD

En la zona de la izquierda se pueden ver el tiempo y coste de impresión además de los volúmenes de material hasta la capa seleccionada en la barra inferior. En la Figura 4-27 se puede observar cómo se disponen los datos indicados.

Figura 4-27. Datos del menú de visión interna referentes a la pieza

Dentro de este menú se puede visualizar el camino exacto que seguirá el cabezal de impresión. Para ello se puede entrar en el menú 2D e ir seleccionando las capas que se deseen dentro de la pieza como se ve en las figuras. En la Figura 4-28 y Figura 4-29 se muestra dos ejemplos de cómo se disponen dichas capas.



Figura 4-28. Capa de fibra de carbono en el Internal view

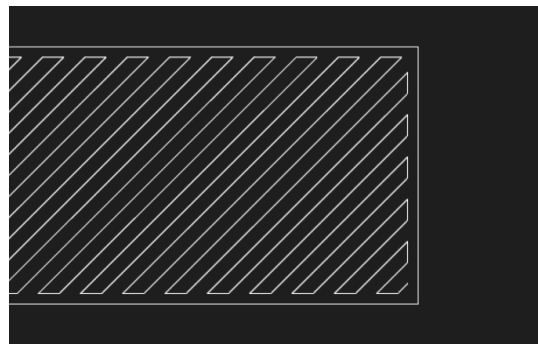


Figura 4-29. Capa de Onyx en el internal view

Por último, en *Internal view* se tiene a la derecha una serie de parámetros de impresión separados por capa que se pueden modificar. Dichos parámetros se muestran en la Figura 4-30.

Algunos de estos parámetros ya estaban en el menú de *Part View: Use Fiber, Fiber Fill Type, Concentric Rings* y *Fiber Angle*. Aquí se permite volver a variar estos parámetros.

Las dos opciones más importantes en este menú son:

Pause After Layer: esta opción para la impresión automáticamente una vez se acaba de imprimir esta capa. Esto es muy útil si se sabe que va a ser necesario cambiar algún rollo de material, colocar una lámina de teflón para evitar la unión de parte de las capas o se desea introducir algún tipo de material en el interior.

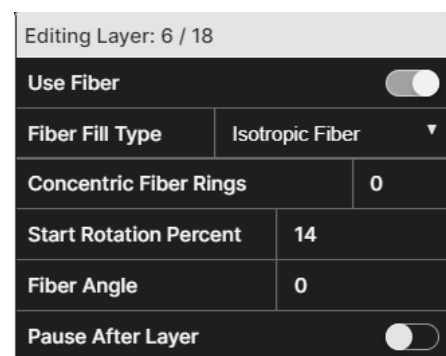


Figura 4-30. Parámetros de impresión disponibles dentro del *Internal View*

Start Rotation Percent: con este parámetro se puede controlar dónde comienza a imprimir la fibra. Esto es de gran importancia en numerosas situaciones. Por defecto el programa coloca el inicio de la fibra en lo que reconoce cómo los extremos de la pieza, que pueden no ser los correctos. Además, cuando se imprime con *concentric ring*, el lugar dónde comienza a imprimir la fibra va rotando unos pocos grados alrededor de la pieza a medida que se imprimen las capas. Esto puede causar que en la zona dónde los esfuerzos son mayores la fibra sea discontinua. Por ello es de vital importancia que antes de imprimir una pieza se comprueben los inicios de fibra capa por capa y confirmar su correcta colocación.

Una vez comprobados todos los parámetros de impresión se procede a la impresión de la pieza pulsando *print*.

4.4.2.4 Impresión de la pieza

El menú de impresión es el último paso antes de comenzar la fabricación de la pieza. En la Figura 4-31 se puede observar dicho menú.

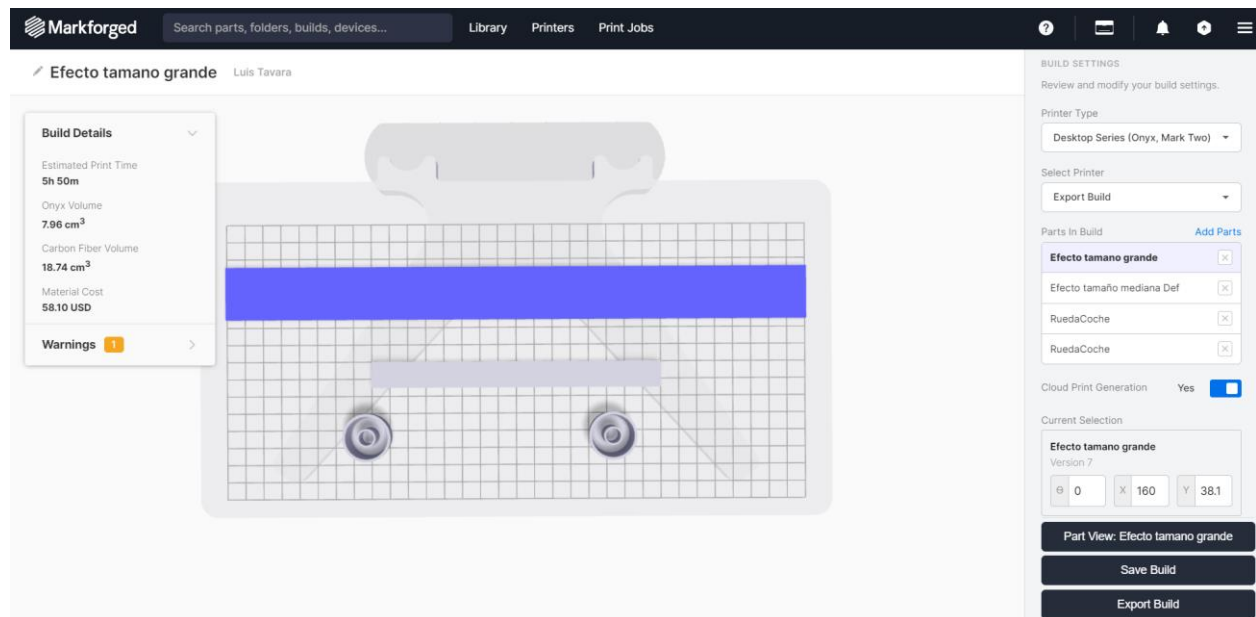


Figura 4-31. Menú de impresión de Eiger

En la zona de la izquierda el programa ofrece una serie de parámetros de impresión:

Select Printer: Se da a elegir el método por el cual se va a enviar el archivo a la impresora. Se puede imprimir online o descargar el archivo, pasarlo a un pen drive y luego abrir el archivo desde la impresora.

Parts in Build: Esta opción permite añadir cualquier pieza de la biblioteca al archivo de impresión, mientras quepan en la cama de impresión y los materiales entre las piezas sean los mismos. Esta característica permite añadir múltiples piezas por impresión, aumentando así el número de horas que puede funcionar la máquina sin supervisión.

Posicionamiento de las piezas: Una vez se hayan añadido las piezas que vayan a imprimir, se puede colocar una a una en la cama de impresión en la posición que se desee. Para esto se puede seleccionar la posición del eje x e y de la cama, así como el ángulo en el plano de esta como se ve en la Figura 4-32.



Figura 4-32. Parámetros para el posicionamiento de la pieza dentro de la cama de impresión

Una vez todas las piezas estén colocadas correctamente se puede guardar la configuración para acabar más tarde o exportarla en un archivo .mfp para proceder a su impresión. Si se decide exportarla, Eiger también permite enviar la impresión de manera online o descargar el archivo, pasarlo a un pendrive y pasarlo a la impresora.

Antes de comenzar la impresión es necesario asegurar que la cama esté nivelada y que haya el suficiente material. Después hay que limpiar la cama con un paño húmedo, secarla y cubrir la zona de impresión con pegamento de barra o laca como se indica en el manual [24].

4.4.3 Estudio de impresiones

Antes de comenzar con los ensayos se ha realizado un estudio en profundidad de la impresión en Eiger, principalmente de cómo este imprime las fibras y el plástico. Los principales objetivos son: comprobar si lo que se muestra en el programa es una fiel representación de lo que se imprime e intentar maximizar el contenido de fibra en cada probeta.

4.4.3.1 Comprobar la disposición de las capas que imprime la impresora, tanto su espesor real como la distancia entre filamentos en planta.

Es muy importante conocer el comportamiento exacto de la impresora, para ello se hace clave controlar el número de filamentos que introduce respecto a lo que expone el programa Eiger. Para ello se va a realizar una serie de probetas de un espesor controlado, diseñadas en 3D y se va a comprobar la veracidad de lo mostrado en el programa. Es importante destacar, como se ha visto con anterioridad, que el espesor de las capas de la impresora es constante cuando se usan fibras de refuerzo. También es inevitable la impresión tanto de una capas superior e inferior de Onyx como de las paredes de 0,4 mm que se imprimen en todas las probetas.

- **2 probetas, una de 1 capa de espesor y otra de 2 capas de espesor**

Para comenzar estas pruebas se va a diseñar una probeta pequeña de 1 capa de espesor. Se ha usado la configuración isotropic fiber, con 0 concentric fiber y una orientación de la fibra de 0. Para que tenga una capa de fibra de espesor del archivo 3D de la Figura 4-33 teóricamente ha de ser de 0,375 mm de espesor.

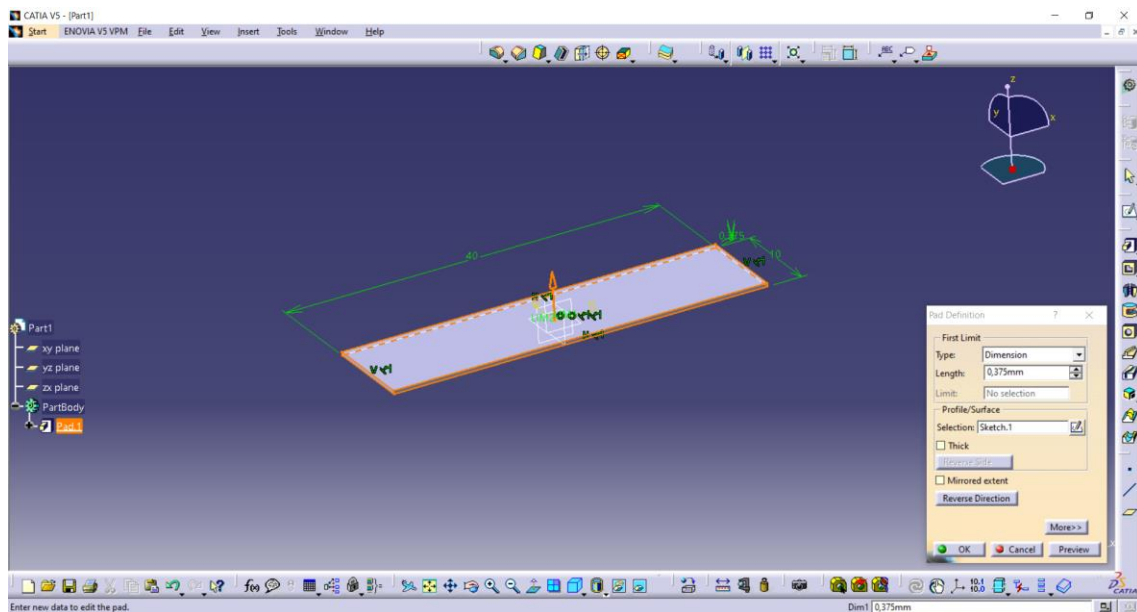


Figura 4-33. Probeta de estudio diseñada en CATIA

Una vez introducido, Eiger redondea a un decimal, por lo que el espesor que nos da es de 0,4 mm de los 0,385 reales diseñados en la pieza como se ve en la Figura 4-34.

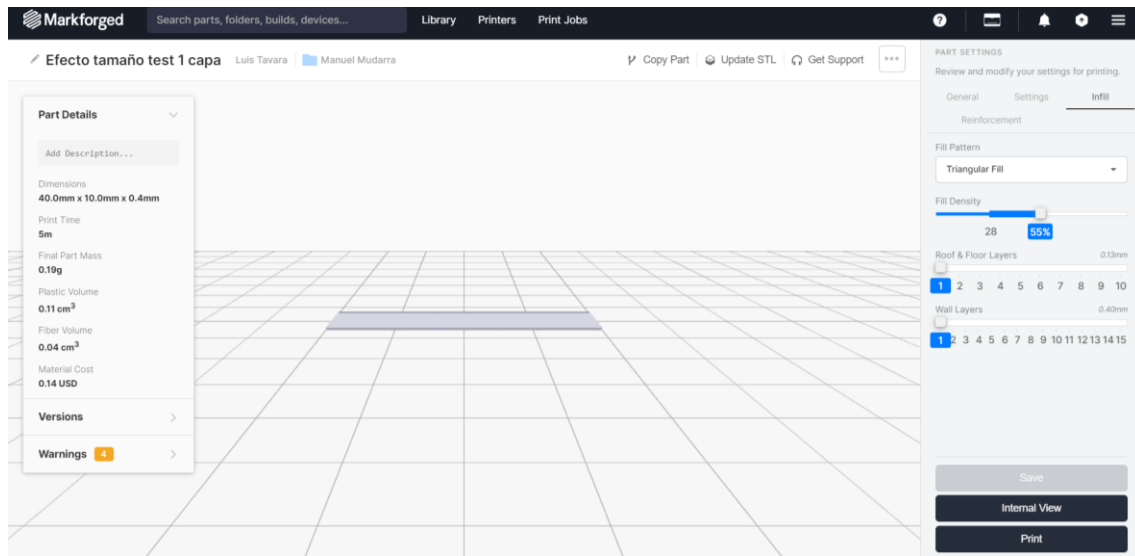


Figura 4-34. Probeta de una capa en Eiger

A continuación, se diseña otra probeta de 0,5 mm de espesor. Esta vez no es necesario el redondeo en el programa, ya que el espesor dado por la impresora es el mismo que el introducido. El programa muestra que efectivamente se van a imprimir 2 capas de fibra de carbono, y 9 filamentos de ancho en cada una de las capas como se ve en la Figura 4-35. Estas probetas junto a la siguiente se imprimirán las 3 juntas para estudiar de cerca el proceso de impresión.

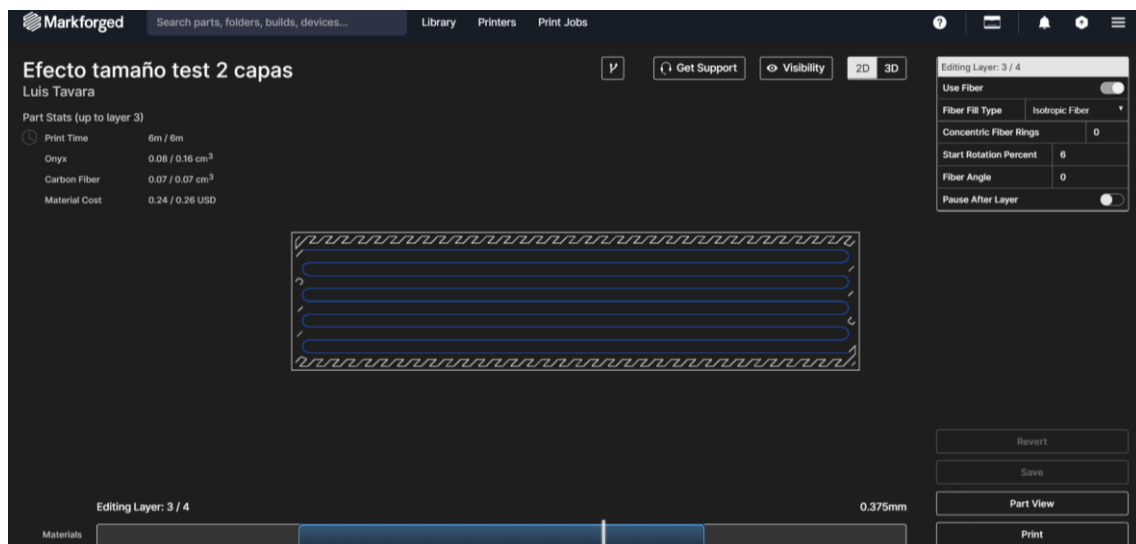


Figura 4-35. Probeta de dos capas en el internal view de Eiger

- **Para 0,575 mm de espesor**

Para comprobar cuál es el comportamiento del programa respecto al redondeo se va a aumentar ligeramente el espesor de la pieza desde los 0,500 mm hasta los 0,575 mm, para comprobar si imprime una capa extra de compuesto, de Onyx o varía el tamaño de la pieza para llevarlo al tamaño más parecido.

El programa vuelve a redondear, esta vez a 0,6 mm como se ve en la Figura 4-36, y ha introducido una capa más de fibra. Eiger parece que una vez introducidos los datos del .stl, recalcula el tamaño de la pieza para que coincida con los espesores cuantizados de la máquina.

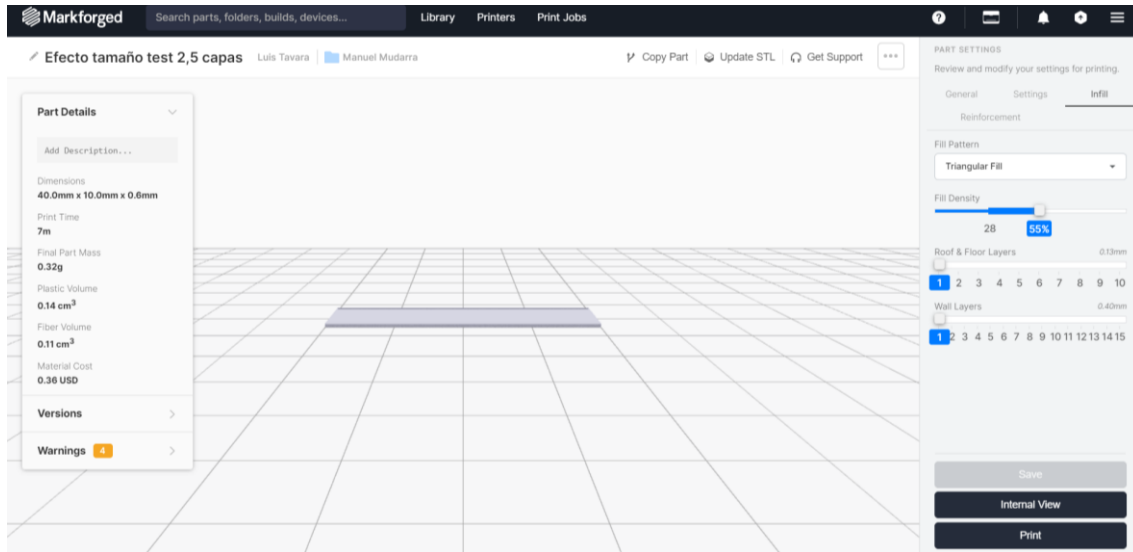


Figura 4-36. Probeta con un espesor de 0,575 mm en Eiger

Una vez diseñadas las piezas, se han fabricado en la impresora Mark Two®. Se ha comprobado positivamente que imprime los 9 filamentos de fibra que se mostraban en el programa en los 10 mm de ancho además de las capas que ha de imprimir. Si tenemos en cuenta los dos muros de 0.4 mm y el propio ancho de la pieza, se puede estimar un espesor de filamento aproximado de 1mm. En la Figura 4-37 se muestra la primera capa de fibra de las 3 probetas y como se han impreso los 9 filamentos esperados.

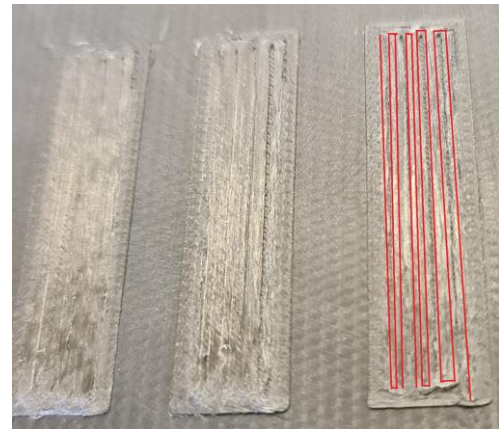


Figura 4-37. Primera capa de fibra impresa en las 3 probetas de estudio



Figura 4-38. Micrómetro usado para medir el espesor de las probetas

Para comprobar la fiabilidad de los datos se ha medido el espesor de las 3 probetas en 3 puntos distintos con el micrómetro de la Figura 4-38, y a continuación se ha hecho una media de estas. En la Tabla 6 se pueden observar los resultados obtenidos.

Tabla 6. Espesor de las probetas impresas

Probeta	Espesor Medio
0,4	3,85
0,5	0,545
0,6	0,649

Los espesores parecen desviarse un poco de los esperados según los diseños. Esto se puede explicar por la rugosidad superficial de las probetas, que, al no disponer de un micrómetro de bolas, interfiere en la medición de los resultados. Otra explicación que parece ajustarse bien con los resultados es el redondeo de Eiger. Este redondeo del espesor solo llega a las décimas, sin embargo, las capas con la fibra de carbono tienen 0,125 mm de espesor. De esta manera con 3 capas se daría un espesor de 0,375 mm de espesor reales, no 0,4 mm como mostraría Eiger.

4.4.3.2 Aumentar el ancho de 0.1 mm y ver el comportamiento de la probeta en Eiger:

En este test se quiere comprobar el proceso que sigue el programa para añadir las fibras en el ancho de la pieza y los patrones que se pueden observar. Todas las probetas van a ser de 0,5 mm de alto, y comenzando por 1 mm de ancho se va a ir aumentando 0,1 hasta que aparezca el primer filamento de fibra y el segundo en el programa.

Cómo se puede comprobar en la Figura 4-39 y Figura 4-40, Eiger solo empieza a imprimir a partir de 3 fibras como mínimo. Estas 3 fibras con los muros de Onyx ocupan como mínimo 3,7 mm de ancho. Con estos datos se puede inferir que cada una de las fibras ocupa aproximadamente 1mm en el plano. Viendo que los datos no son 100% predecibles en el programa, se probará en cada ensayo cada tamaño de probeta de 0,1 mm en 0,1 mm para optimizar la densidad de fibras, aumentando así la tensión de rotura de la probeta.

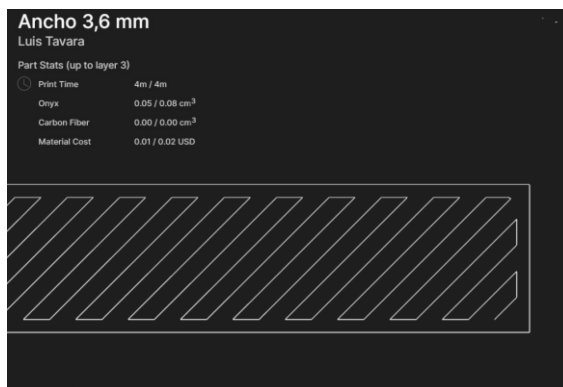


Figura 4-39. Visión interna de la probeta con un ancho de 3,6 mm de ancho



Figura 4-40. Visión interna de la probeta con un ancho de 3,7 mm de ancho

Para seguir estudiando este patrón se ha aumentado de 0,1 en 0,1 mm el ancho de la probeta hasta que vuelvan a aparecer nuevas fibras. Eiger rellena los huecos restantes con Onyx o Nylon hasta que caben otros dos filamentos de fibras, con unos 2 mm más. Por tanto, se infiere que la impresora Mark Two[®] solo es capaz de imprimir números impares de fibras en la configuración de fibra isotropa sin anillos concéntricos.

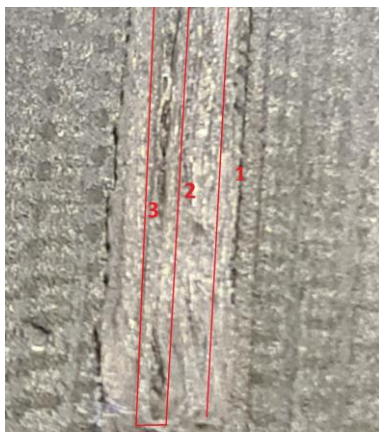


Figura 4-41. Interior de la probeta de 3,7 mm donde se pueden ver los 3 hilos

Una vez todas las probetas en estos tests se han impreso, se ha comprobado que lo mostrado en el programa Eiger es una fiel representación del proceso de impresión que toma la impresora Mark Two[®]. Como se ve en la Figura 4-41 la impresora ha fabricado la probeta tal y como se ha descrito en Eiger.

Comprobado esto, se procederá en el siguiente capítulo a diseñar y modelar los ensayos con la certeza que lo que se muestre en el programa será una buena base para realizar los cálculos y estudios. En el siguiente capítulo también se hará un seguimiento tanto de las medidas reales de las probetas impresas así como del comportamiento de Eiger para los distintos ensayos diseñados.

4.5 Costo Monetario y Mantenimiento

Uno de los aspectos más importantes que ya se ha destacado anteriormente es el coste de impresión. Este aspecto se hace vital para poder comparar esta tecnología con otras de fabricación de materiales compuestos y de impresión 3D. A continuación, se muestran la Tabla 7 y la Tabla 8 donde se puede ver el coste tanto de los materiales consumibles como de las piezas más importantes y comúnmente sustituidas [29]. En la Figura 4-42 se tiene una de las bobinas de material disponible, en este caso una de fibra de carbono de 50 cm³.



Figura 4-42. Bobina de fibra de carbono al 50 %

Tabla 7: Coste de materiales consumibles por la impresora Mark Two[®]

Material	50 cm ³	150 cm ³	800 cm ³
Nylon	-	-	170 €
Onyx	-	-	190 €
Fibra de carbono	150 €	450€	-
Fibra de Vidrio	80 €	230€	-
Kevlar [®]	100 €	300 €	-
HSHT Fibra de vidrio	100 €	300 €	-

Tabla 8: Coste de accesorios y piezas más comunes de la impresora Mark Two[®]

Elemento	Coste [€]
Impresora	18874 [30]
Láminas de calibración	15

Tubos protectores	15
Tubos conductores	15
Tubo conductor para fibra	85
Tubo conductor para plástico	40
Pack Boquilla de plástico y fibra	50
Cama de impresión	150
Caja Estanca	200
Extrusor de plástico	450
Extrusor de fibra	440
Cabezal de impresión	1320

Nota: ninguno de estos precios incluye IVA.

Dentro del Manual se describe el mantenimiento que requiere la impresora [24]. Este mantenimiento es vital para el correcto funcionamiento de la impresora. En caso que no se lleve a cabo puede provocar desde una impresión de baja calidad o hasta la rotura de ciertos componentes. A continuación, en la Tabla 9, se hace un resumen del mantenimiento necesario.

Tabla 9. Mantenimiento diario, a medio plazo y a largo plazo de la impresora Mark Two®

Diariamente	Corto plazo	Largo plazo
Limpiar cualquier residuo de la cama y pantalla tras cada impresión	Actualizar la impresora	Reemplazar la boquilla de impresión de plástico cada 3-6 meses o 1000 horas de impresión
Comprobar que hay suficiente material para la siguiente impresión	Cambiar las bolsas de desecante cada vez que se cambie el plástico	Reemplazar la boquilla de impresión de fibra cada 1-3 meses o 500 horas de impresión
Comprobar el buen estado de las boquillas de extrusión	Comprobar el desgaste de los tubos especialmente si se está usando Onyx	Ajustar la tensión de las correas según especificación cada 250 horas o si se ha reemplazado un componente del sistema de desplazamiento
Comprobar que los tubos no tengan dobleces que puedan interferir en el paso del plástico o la fibra	Limpiar las boquillas y comprobar su estado de conservación	Cambiar todos los tubos y terminaciones de estos cada 3-6 meses o 1000 horas de impresión. En el caso del tubo de extrusión de fibra cada 1-3 meses o 500 horas de impresión

Cada 5- 20 minutos comprobar la nivelación de la impresora con las láminas de nivelación	Ajustar el nivel de la cama junto al de las dos boquillas de impresión después de 2-4 impresiones o si ha detenido la impresión por atascamiento del cabezal.	
	Si transcurren varios días entre impresiones hay que purgar la línea de plástico	

Capítulo 5: DISEÑO Y REALIZACIÓN DE ENSAYOS

5.1 Introducción

El objetivo principal de este trabajo, como ya se vio anteriormente, es caracterizar y determinar el efecto escala en probetas de fibras de carbono y de vidrio fabricadas con la impresora 3D Mark Two[®]. Para ello se van a imprimir 3 tamaños de probetas para cada material y 5 probetas de cada uno, siendo en total una batería de 30 ensayos. Los ensayos se van a realizar en la máquina Instron 4483 a un ratio de deformación de 1,25 % por minuto. El diseño de estos ensayos se ha basado en la norma ASTM D3039 para los ensayos a tracción de materiales compuestos [31] y en el artículo publicado *Effect of specimen size on longitudinal strength of unidirectional carbon/epoxy composite laminates* por M. Kawai, K. Watanabe, H. Hoshi, E. Hara & Y. Iwahori en 2019 [32]. Ciertas variaciones se han llevado a cabo a causa de las limitaciones de utillaje y maquinaria que ya se verán más adelante.

5.2 Diseño de las probetas

5.2.1 Diseño preliminar

Para el diseño de las 3 probetas de vidrio y carbono se ha buscado que, de un tamaño a otro, cada una de las dimensiones de impresión en fibra dupliquese el tamaño, multiplicando así el volumen de fibra por 8 entre una probeta y la siguiente. El control del volumen de fibra impresa, que va a ser el objeto de ensayo, es de vital importancia. Por ello, se han aplicado los conocimientos extraídos de los tests realizados de impresión de fibra y se ha llevado un control exhaustivo de las impresiones.

Para el diseño exacto de las dimensiones de probetas se ha comenzado estableciendo la longitud de éstas. Siendo 320 mm la longitud máxima de impresión posible, se ha establecido ésta como la longitud de la probeta de gran tamaño. Para los siguientes tamaños se ha reducido a la mitad cada uno, quedando 160 y 80 mm para la probeta de tamaño medio y la pequeña, respectivamente.

En cuanto al ancho, como ya se vio en el capítulo 4, no es posible imprimir un número par de hilos de fibras en la impresora Mark Two[®]. Esto hace imposible duplicar el número de hilos de fibra impresos manteniendo el mismo patrón de impresión. Por ello se ha decidido que las probetas tengan el doble de hilos + 1 en cada una. Comenzando por la probeta más pequeña se ha decidido que esta tenga 7 hilos de fibra, lo que posiciona a la de tamaño medio con 15 y la de gran tamaño 31 hilos.

Por otra parte, se ha buscado un espesor de fibra de 0,5 mm para la probeta más pequeña, 1 mm para la mediana y 2 mm para la de mayor tamaño. Estas medidas se han diseñado para evitar un espesor excesivo en la probeta de mayor tamaño.

5.2.2 Diseño 3D e implementación en Eiger

Para el diseño 3D se ha usado el programa de modelado 3D CATIA y luego se ha introducido el archivo .stl en Eiger. Dentro de este se han seleccionado los parámetros correspondientes para realizar estos ensayos.

En primer lugar, se han reducido el número de capas superficiales y muros de Onyx a 1. Esto da un espesor de cada muro de 0.4 mm por lado y un espesor de las capas superficiales de Onyx de 0,125 mm para las probetas de carbono y de 0,1 mm de espesor de capa superficial para las de vidrio. Estos muros y capas superficiales habrán de tenerse en cuenta más adelante para conocer la resistencia real de las fibras de carbono y de vidrio.

Se ha seleccionado la opción de *isotropic fiber* en el refuerzo, con 0 anillos concéntricos y el ángulo de 0°. En cuanto al infill, aunque no va a imprimirlo, ya que solo hay capas de superficie y muros de onyx, se ha seleccionado el triangular con una densidad del 55 %. Todas las opciones seleccionadas en Eiger se muestran en la Figura 5-1. De estos parámetros solo se variará al tipo de refuerzo usado y las capas de este.

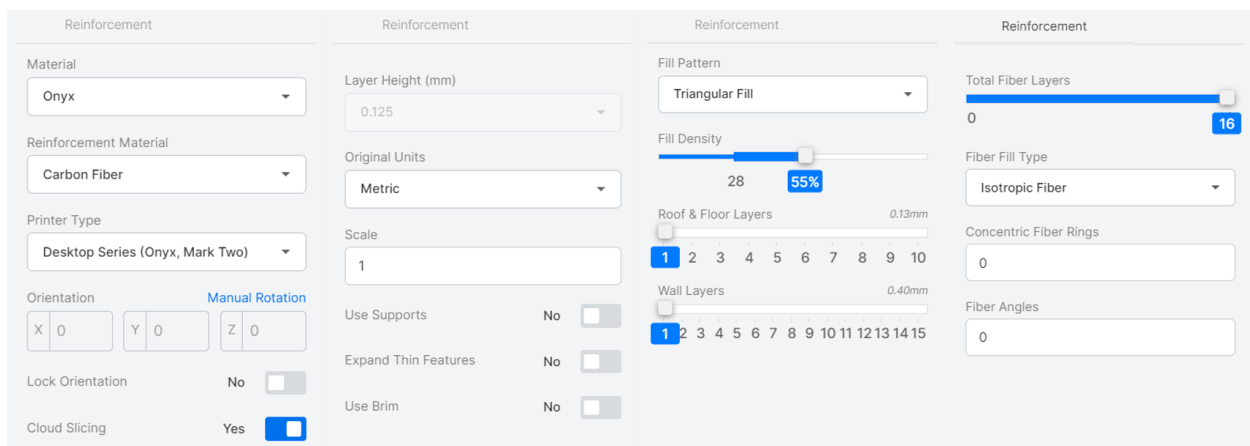


Figura 5-1. Parámetros de impresión usados para la fabricación de las probetas

El largo de todas las probetas se ha diseñado en 3D tal y como se ha descrito en el apartado 5.1.

Para el espesor se ha inferido dependiendo del material y el espesor de capas requeridos. En el caso de las probetas de fibra de carbono, el espesor por capa es de 0,125 mm, por lo que para las probetas pequeñas el espesor del archivo .stl será de $0,125 \times 4$ para las capas de fibra carbono y de $0,125 \times 2$ para las capas de Onyx de superficie. Dando en total un espesor de 0,75 mm. Para el resto de las probetas de carbono se ha duplicado el número de capas de refuerzo de las de la probeta anterior y sumando las capas superficie de Onyx, da unos espesores de 1,25 mm para la probeta mediana y de 2,25 mm de espesor para la probeta de gran tamaño.

Con las probetas de vidrio se ha seguido un proceso idéntico para inferir el espesor deseado del archivo .stl. El espesor de cada capa de refuerzo de vidrio es de 0,1 mm, al igual que las capas de superficie impresas al usar este tipo de material de refuerzo. Por ello, para mantener 0,5 mm de espesor de fibra en las probetas pequeñas se imprimirán 5 capas de fibra en las probetas de menor tamaño, 10 en las de tamaño medio y 20 en las de mayor tamaño. Esto da un espesor final de 0,7 mm para las probetas pequeñas, 1,2 mm para las medianas y 2,2 mm para las grandes.

Por último, para el ancho de las probetas se busca que las probetas tengan 7, 15 y 31 filamentos de fibra, maximizando así la densidad de fibra dentro de las probetas. Como ya se ha visto en el capítulo 4 para distintos anchos Eiger puede imprimir la misma cantidad de fibra y rellenar el resto con Onyx. Por ello para cada uno de los 6 tipos de probetas a diseñar se ha partido de un ancho el cual imprima menos fibras de las deseadas. Después se ha ido aumentando de 0,1 mm en 0,1 mm hasta la primera probeta que imprima el número de fibras deseado. Realizando este procedimiento y contando con los muros que se imprimen de Onyx las probetas de menor tamaño tendrán un ancho de 7,3 mm, las de tamaño medio 14,5 mm y las de mayor tamaño 28,9 mm. Es

importante destacar que, aunque los filamentos de fibra de carbono sean más altos que los de vidrio una vez impresos, su ancho es idéntico.

Una vez determinadas todas las dimensiones, estas se resumen en la Tabla 10 junto con el tiempo de impresión de cada una. Entre paréntesis se exponen las dimensiones sin los muros ni superficies de Onyx.

Tabla 10. Dimensiones y tiempos de impresión de todas las probetas diseñadas

Probeta	Largo [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Tiempo de Impresión [min]
Pequeña carbono	80	7,3 (6,5)	0,75 (0,5)	9
Mediana carbono	160	14,5 (13,7)	1,25 (1)	37
Grande carbono	320	28,9 (28,1)	2,25 (2)	231
Pequeña vidrio	80	7,3 (6,5)	0,7 (0,5)	10
Mediana vidrio	160	14,5 (13,7)	1,2 (1)	44
Grande vidrio	320	28,9 (28,1)	2,2 (2)	296

Todos estos parámetros de diseño se han comprobado en internal view en Eiger, para asegurar que no exista ninguna anomalía. A continuación, en la Figura 5-2, se muestra una de las probetas diseñadas en Eiger.

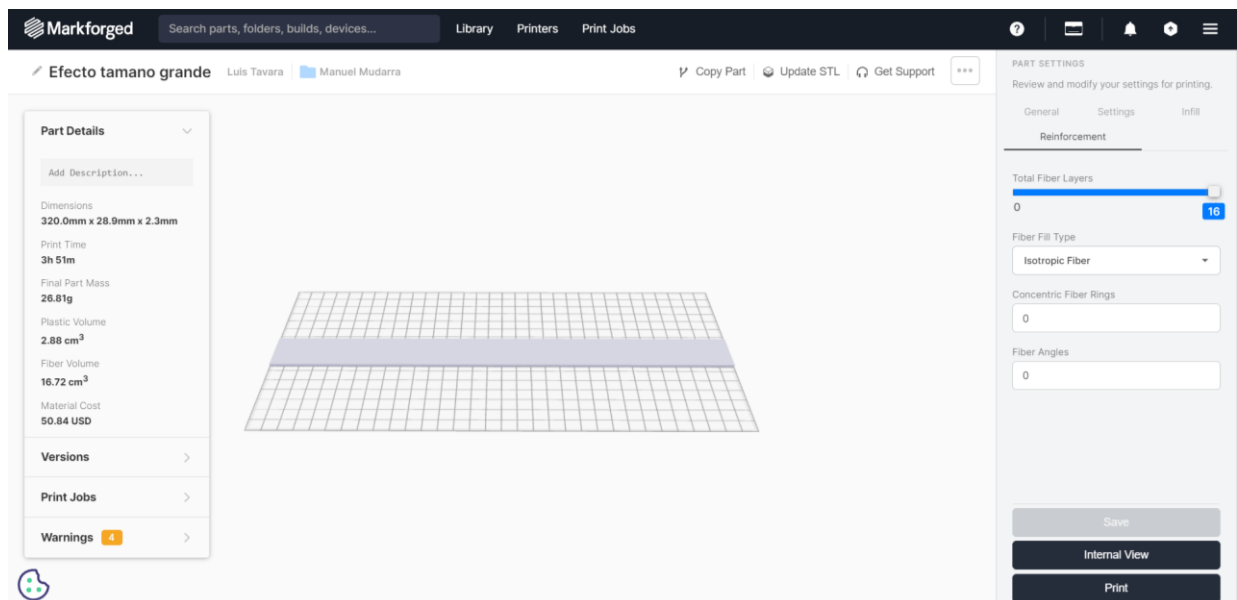


Figura 5-2. Probeta de fibra de carbono de tamaño grande en Eiger

Estas probetas estarán unidas en los extremos por tacos para su agarre a las mordazas. Siguiendo las proporciones del artículo [18]. El objetivo final es que el volumen ensayado se siga multiplicando por 8 de una probeta a otra, por lo que los tacos de fibra de vidrio cubrirán todo el ancho de la probeta y cada uno de los tacos un cuarto de la longitud de esta, con los resultados que se indican en la Tabla 11:

Tabla 11. Dimensiones deseables para los tacos de las probetas

Taco de la probeta Probeta	Espesor [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]
Pequeña	0,6	20	8,5
Mediana	0,6	40	16
Grande	0,6	80	30

Sin embargo estos tacos fueron acortados una vez las probetas se fabricaron por carecer de mordazas lo suficientemente grandes para agarrar completamente los tacos de las probetas grandes. Para seguir manteniendo la proporción todos los tacos fueron recortados en concordancia, con las longitudes finales que se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12. Dimensiones finales de los tacos

Taco de la probeta Probeta	Espesor [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]
Pequeña	0,6	14	8,5
Mediana	0,6	28	16
Grande	0,6	56	30

Aunque este corte se podía haber evitado si se hubiese planeado desde un primer momento, en los ensayos de las probetas de vidrio que se realizaron conociendo este problema, se va a seguir el mismo procedimiento para reducir al mínimo la variabilidad entre los distintos ensayos.

5.3 Fabricación de las probetas

Cabe destacar que durante la impresión de estas probetas aparecieron ciertos problemas con la impresora. En este capítulo sólo se describirán brevemente algunos de ellos, dejando una explicación más exhaustiva para el capítulo 6.

5.3.1 Impresión de las probetas

- **Probetas de carbono**

Se ha comenzado imprimiendo las probetas de carbono de menor a mayor tamaño, controlando siempre el número de fibras impresas y que no existiese ninguna anomalía durante la impresión. Las probetas pequeñas y medianas fueron fabricadas en la misma impresión en principio sin problemas. En cuanto a las grandes, por el gran volumen de fibra usado en cada una de ellas, si se hubiese impreso más de una hubiera sido necesario el cambio del rollo de fibra durante la impresión, por lo que se decidió imprimirlas una a una. El resultado de estas impresiones se puede observar en la Figura 5-3.

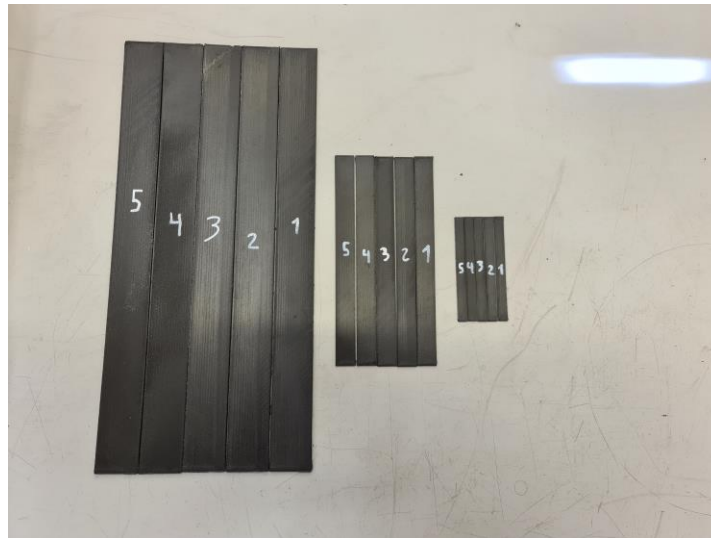


Figura 5-3. Probetas de fibra de carbono recién impresas

A medida que se han manipulado las probetas se ha observado que las probetas grandes 2 y 3, así como la probeta pequeña 1 presentan unas delaminaciones parciales de la capa Onyx en una de sus caras. Estas delaminaciones se pueden ver en la Figura 5-4 y Figura 5-5. Teniendo en cuenta la pequeña influencia de la capa de Onyx en la resistencia a tracción de estas probetas y el tipo de ensayo que se va a realizar, se estima que el impacto en los resultados será despreciable. Aun así, se monitorizarán el comportamiento de estas probetas. Algo que si se ha tenido muy en cuenta es la colocación de las galgas extensométricas en las caras donde no hubiese ningún tipo de delaminación. Por otra parte, se observa que una de las probetas pequeñas en esta tanda, la número 4, es algo más gruesa que el resto y parece más rígida. De esta manera se decide imprimir una probeta más, para usar en caso de que ésta tenga algún defecto que invalide el ensayo.



Figura 5-5. Delaminación parcial de una probeta de fibra de carbono grande vista desde el lateral



Figura 5-4. Delaminación parcial de una probeta de fibra de carbono grande vista desde arriba

Es importante destacar que desde que fueron impresas, hasta los ensayos, todas las probetas fueron almacenadas en una campana como se ve en la Figura 5-6, para evitar que el nylon absorbiese el agua del ambiente y que se viesen degradadas las propiedades del material.



Figura 5-6. Almacenamiento de las probetas en una campana de secado

- **Probetas de vidrio**

Para la fabricación de las probetas de vidrio se ha seguido el mismo método que para las de carbono, comenzando por las más pequeñas y siguiendo por las más grandes. Para ello se dispuso la impresión en cuatro tandas. En la primera se imprimirían las probetas de menor tamaño como se ve en Figura 5-7. Este proceso no tuvo ningún problema a excepción de una pequeña decoloración de la capa superficial de Onyx, lo cual puede ser debida a una falta de material de cobertura en la superficie.

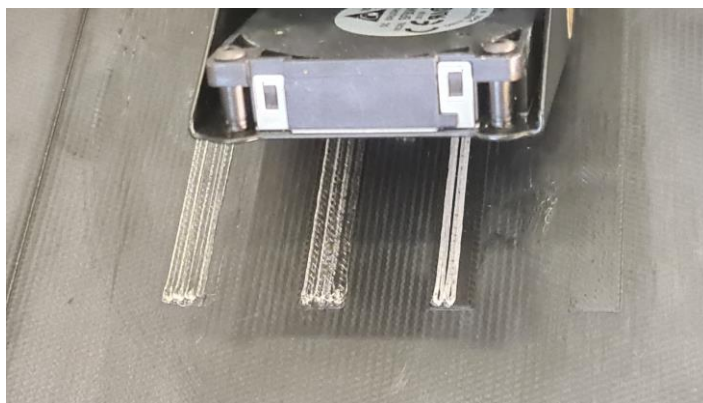


Figura 5-7. Impresión de las probetas de fibra de vidrio pequeñas

En la segunda tanda se han impreso las cinco probetas de tamaño mediano. Estas presentan la misma decoloración en la parte superior como se ve en la Figura 5-8 y unas deformaciones residuales que alabea ligeramente la probeta del centro a los extremos. Este tipo de deformaciones no estaban presentes en ninguna de las probetas de fibra de carbono, lo que indica que en el caso del refuerzo con fibra de vidrio existen tensiones residuales en las probetas.

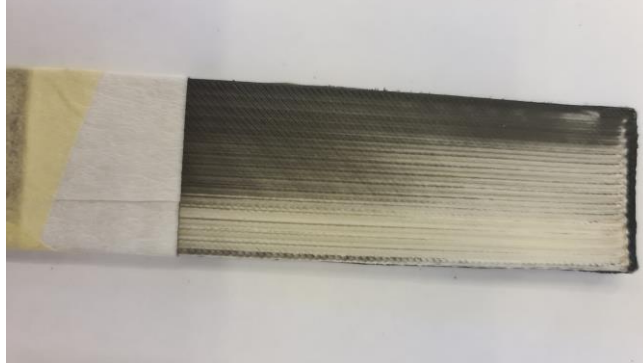


Figura 5-8. Decoloración de la capa superior en una probeta de fibra de vidrio mediana

A continuación, se dispuso a imprimir las 2 tandas de probetas de gran tamaño, sin embargo, varios defectos retrasarían este trabajo. En primer lugar, se intentó imprimir en este caso 3 probetas de gran tamaño juntas, aprovechando que los rollos de los que se disponían eran de 150 cm³, en lugar de los de 50 cm³ de las de carbono. Las primeras 2 horas de impresión transcurrieron sin problemas. Varios minutos después se regresó a la zona de trabajo, encontrando la máquina imprimiendo fibras erráticamente sin adherirse a las probetas como se muestra en Figura 5-9. La fuente de exacta este error se desconoce, pero parece haber sido causada por una reacción en cadena partiendo de un pequeño defecto.



Figura 5-9. Fallo de impresión durante la impresión de probetas de vidrio de gran tamaño

Ante este primer error se decidió imprimir las probetas de una en una, reduciendo así la posibilidad de un error de impresión y minimizando el gasto de material en el caso que este se diese. La siguiente probeta se imprimió en solitario y el resultado fue peor de lo esperado. Esta tenía unas deformaciones residuales muy severas además de la decoloración que ya se ha dado en el resto de las probetas reforzadas con vidrio. Para evitar este tipo de deformaciones se rediseñó la probeta con un brim, aumentando así la superficie de contacto de la probeta con la cama de impresión como se ve en la Figura 5-10.

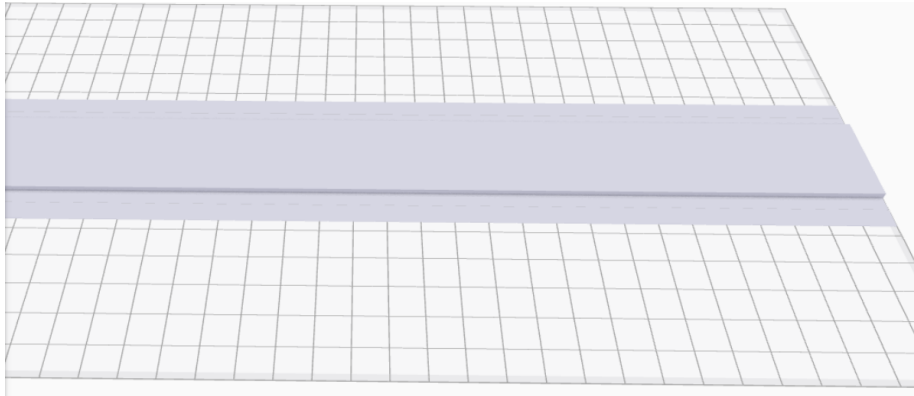


Figura 5-10. Probeta grande de fibra de vidrio con brim

Este brim parece evitar que se despegue la probeta de la cama durante la impresión, sin embargo, una vez se retira de este, las deformaciones vuelven a aparecer. Sin conocimiento de si este hecho era aislado o si se iba a producir en todas las probetas se imprimieron finalmente 6 con brim y una sin él. Finalmente, no se pudo distinguir una mejora significativa entre los dos métodos. Es por esto por lo que, para este tipo de probetas se dispone de 7 especímenes en vez de 5. La severidad de este hecho se ve reflejada en la Figura 5-11, donde se muestra la última probeta impresa con brim.



Figura 5-11. Deformaciones en la probeta nº 7 de fibra de vidrio grande

Como se puede observar, las deformaciones residuales son muy severas, hecho que puede afectar negativamente a los ensayos. Además, estas probetas presentan en algunas zonas delaminaciones en los extremos aún más severas y generalizadas en la capa de Onyx que la de fibras de carbono. Finalmente, en la Figura 5-12 se muestran todas las probetas impresas, preparadas para el siguiente paso del proceso.

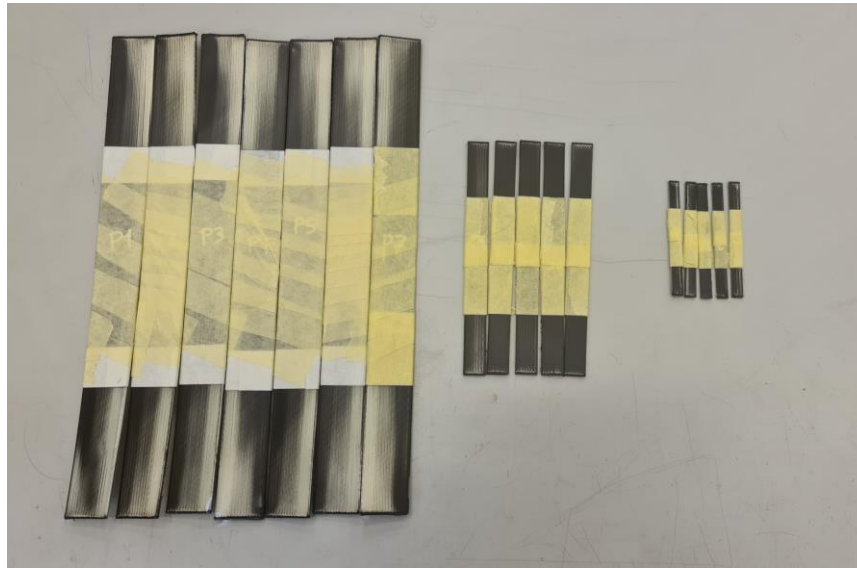


Figura 5-12. Probetas de fibra de vidrio impresas

5.3.2 Medición de las probetas

Una vez impresas todas las probetas se ha procedido a su medición. Para ello se ha hecho uso de un calibre como el de la Figura 5-13, y un reloj medidor como el de la Figura 5-14. Obteniendo los resultados de la Tabla 13 y la Tabla 14. Hay que tener en cuenta que, aunque los tamaños de las probetas sean ligeramente distintos de una a otra, la cantidad de refuerzo de fibra en su interior es idéntica. Esta disparidad se explica fácilmente por la gran rugosidad superficial que presenta el Onyx en los muros y en las capas de superficie. Esta rugosidad se puede observar en la Figura 5-4 y la Figura 5-5 expuestas anteriormente.



Figura 5-14. Reloj medidor



Figura 5-13. Pie de rey

Tabla 13. Dimensiones de todas las probetas impresas de fibra de carbono

Probetas Carbono	Espesor [mm]	Ancho [mm]	Longitud [mm]
Pequeña 1	0,75	7,24	80,23
Pequeña 2	0,76	7,35	80,48
Pequeña 3	0,72	7,43	80,59
Pequeña 4	0,82	7,15	80,13
Pequeña 5	0,72	7,48	80,35
Pequeña 6	0,78	7,37	80,31
Mediana 1	1,32	14,47	160,43
Mediana 2	1,36	14,41	160,49
Mediana 3	1,25	14,60	160,27
Mediana 4	1,33	14,55	160,56
Mediana 5	1,24	14,72	160,71
Grande 1	2,28	29,01	320,85
Grande 2	2,31	28,95	320,72
Grande 3	2,30	28,97	321,01
Grande 4	2,27	28,89	320,76
Grande 5	2,32	28,88	320,73

Tabla 14. Dimensiones de todas las probetas impresas en fibras de vidrio

Probeta Vidrio	Espesor [mm]	Ancho [mm]	Longitud [mm]
Pequeña 1	0,7	7,29	80,31
Pequeña 2	0,66	7,27	80,23
Pequeña 3	0,65	7,39	80,61
Pequeña 4	0,69	7,38	80,34
Pequeña 5	0,72	7,28	80,44

Mediana 1	1,17	14,51	160,27
Mediana 2	1,20	14,47	160,56
Mediana 3	1,24	14,36	160,30
Mediana 4	1,23	14,37	160,31
Mediana 5	1,18	14,47	160,51
Grande 1	2,27	28,61	320,67
Grande 2	2,24	28,69	320,84
Grande 3	2,31	28,63	320,63
Grande 4	2,28	28,80	320,77
Grande 5	2,30	28,82	320,96
Grande 6	2,29	28,71	320,74
Grande 7	2,27	28,73	320,71

5.3.3 Corte y pegado de tacos

Los tacos para las probetas se van a fabricar a partir del panel de la Figura 5-15 de fibra de vidrio de 6 capas, con un espesor de 0,6 mm. Se van a recortar 20 tacos para cada tamaño de probeta para poder usarlos tanto con las probetas de fibra de carbono como con las de vidrio. Estos tacos van a ser aproximadamente 1 mm más anchos que las probetas a las que se van a adherir para tener en cuenta la variabilidad de tamaños entre las probetas y evitar que se desalineen los tacos durante el curado. También se le va a dar 1 mm más de longitud a los tacos por el mismo motivo. Todo el material restante será retirado más tarde. Cabe destacar que, para los cortes realizados en este trabajo, tanto de los tacos como de las probetas, se ha usado una sierra circular con disco de diamante refrigerada por agua.

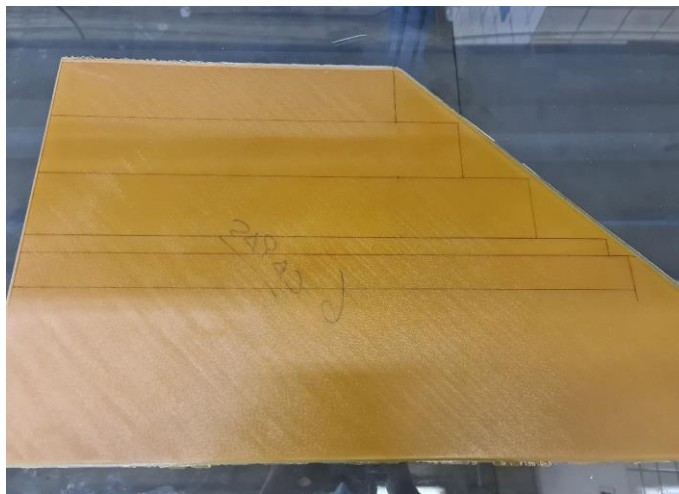


Figura 5-15. Panel de fibra de vidrio del que se van a extraer los tacos

Antes de comenzar el proceso de desbastado de los tacos y los extremos de las probetas se han forrado en cinta de carroceros las probetas por el centro como se ve en la Figura 5-12. Esta cinta cumple dos funciones fundamentales: la primera es proteger la probeta, tanto del adhesivo como del lijado. La segunda es marcar en qué zonas ha de depositarse el adhesivo para seguir los parámetros de diseño establecidos. Por ello todas las probetas se han envuelto con esta cinta y su correcto posicionamiento se ha comprobado en varias zonas con un calibre.

Para pegar los tacos se ha lijado mediante chorro de arena el panel de fibra de vidrio, así como la zona donde van pegados los tacos en todas las probetas. Una vez lijados se ha limpiado cuidadosamente la superficie para evitar la inclusión de partículas. Este proceso se ha llevado a cabo para mejorar la adherencia entre el adhesivo, los tacos y probetas.

Para pegar los tacos a las probetas se ha usado el adhesivo HexBond EA9394 STUCTIL de la marca HEXCEL como el de la Figura 5-16, mezclando 100 partes de componente A y 17 partes de componente B hasta conseguir una pasta homogénea. El pegado se ha realizado en dos tandas de probetas distinguidas, primero las de fibra de carbono y a continuación las de vidrio



Figura 5-16. Adhesivo bicomponente usado para pegar los tacos a las probetas

- **Pegado de los tacos en las probetas de fibra de carbono**

Una vez se ha hecho la mezcla de adhesivo se aplicó una capa tanto a los tacos como a la parte de la probeta correspondiente y se retiró el adhesivo restante. Alrededor de los tacos se ha colocado una película de teflón para evitar que hubiese movimiento de los tacos y para evitar que el pegamento restante acabase en las superficies de trabajo. Para asegurar una correcta adhesión con los tacos se han añadido una serie de pinzas metálicas a las probetas como las de la Figura 5-17.



Figura 5-17. Pinzas usadas para agarrar los tacos a las probetas

Una vez dejado curar el adhesivo 24 horas se retiró el teflón y las pinzas, obteniendo las probetas que se pueden ver en la Figura 5-18.



Figura 5-18. Probetas de fibra de carbono con los tacos ya pegados

A continuación, se han recortado los extremos con la sierra circular a la longitud de diseño. Durante este proceso se ha encontrado un defecto presente en las probetas, un desnivel en los tacos. Al presionar con las pinzas sobre los tacos, en la zona justo debajo de estas la presión era mayor que en el resto y desplazó el adhesivo a las zonas con menor presión. Esto ha causado que los tacos de estas probetas, sobre todo las de mayor tamaño, no sean planos como se puede observar claramente en la Figura 5-19.

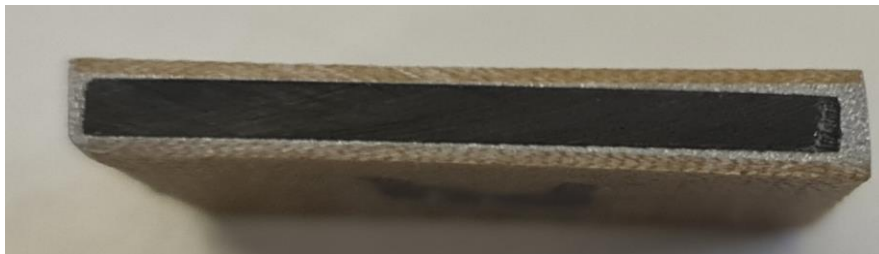


Figura 5-19. Extremo recortado de la grande nº 4, donde se puede apreciar el desnivel en los tacos.

Este desnivel de apenas 1 mm causará, como ya se verá en el siguiente apartado, que la mordaza en la primera probeta ensayada sólo la agarrase por una zona, provocando un fallo prematuro. Para evitar este fallo de nuevo se han lijado los tacos de todas las probetas sobre una superficie plana, eliminando así en mayor parte el desnivel presente en las probetas, obteniendo el resultado que se ve en la Figura 5-20. Hay que tener en cuenta que esto ha debilitado inevitablemente los tacos, ya que se ha quitado parte del material. Además, es posible que este desnivel no se haya eliminado completamente, por lo que habrá que monitorizar muy de cerca el fallo de las probetas de carbono.

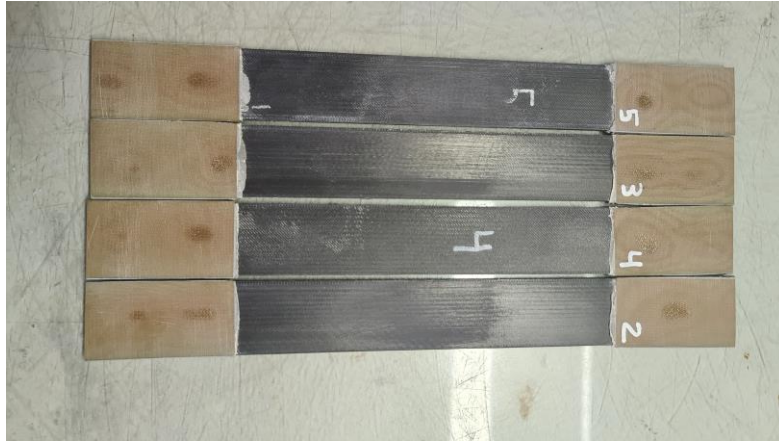


Figura 5-20. Probetas de grandes de carbono con los tacos ya lijados

- **Pegado de los tacos en las probetas de fibra de vidrio**

El proceso de fabricación ha sido muy similar, intentando evitar esta vez la aparición de las deformaciones en los tacos. Primero se lijaron mediante el chorro de arena tanto los tacos como las probetas de vidrio se limpiaron cuidadosamente y se pegaron los tacos con el adhesivo HexBond EA9394.

Es importante destacar que durante el lijado, limpieza y secado de las probetas de fibra de vidrio las delaminaciones de la capa de Onyx inferior se extendieron en gran medida. Las probetas más afectadas sin duda han sido las de mayor tamaño, especialmente las probetas 2, 6 y 7 donde se ha llegado a desprender el Onyx como se ve en la Figura 5-21. Para intentar limitar el efecto se ha adherido los trozos que no se han delaminado junto a los tacos. Aunque se haya delaminado el onyx en esa zona, cabe destacar que en el resto de la probeta si está adherido.

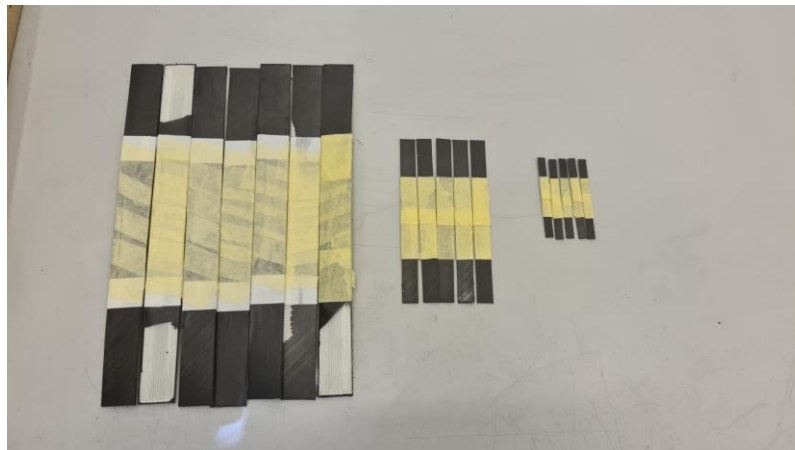


Figura 5-21. Lado afectado de las probetas de fibra de vidrio

Esta vez para el proceso de curado del adhesivo se han usado sargentos junto a planchas de acero de 10 mm de espesor para repartir la presión uniformemente en los tacos. De esta manera se coloca teflón sobre una superficie plana, luego se coloca la probeta, se cubre de nuevo de teflón y se posiciona la plancha de acero. Por último, se aprieta el conjunto con dos sargentos. El procedimiento correcto para este apriete es, poco a poco apretar un sargento primero y luego el otro hasta que estén bien sujeto el conjunto. Es recomendable tener una línea de referencia para asegurarse que la placa no gira mientras se realiza este procedimiento. En la Figura 5-22 se puede observar el fin de este proceso.

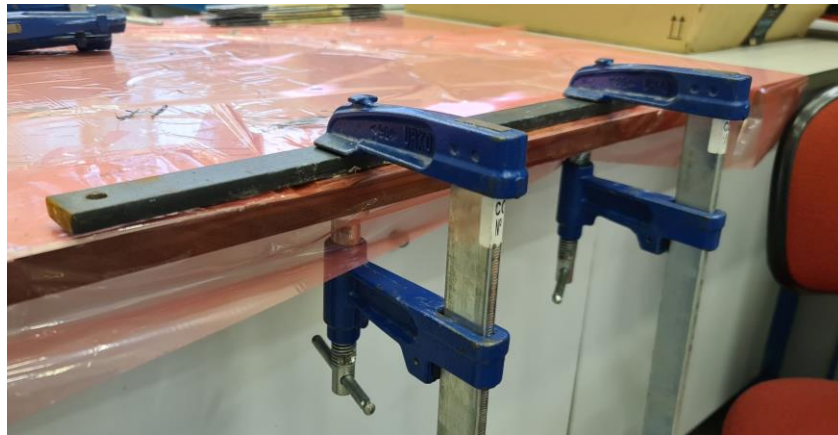


Figura 5-22. Proceso de pegado de los tacos en las probetas de vidrio

Finalmente, el resultado ha sido mucho mejor que el obtenido con las probetas de fibra de carbono, el espesor es completamente uniforme y los tacos no están desalineados. Además, ha tenido un efecto no esperado en las probetas. Al pegar los tacos mientras la probeta estaba completamente aplanada contra la mesa se han eliminado la gran mayoría de deformaciones residuales. A continuación, se han cortados los extremos, se ha eliminado el exceso de adhesivo con una lijadora de banda y se han limpiado las probetas. En la Figura 5-23 se pueden observar los resultados obtenidos.

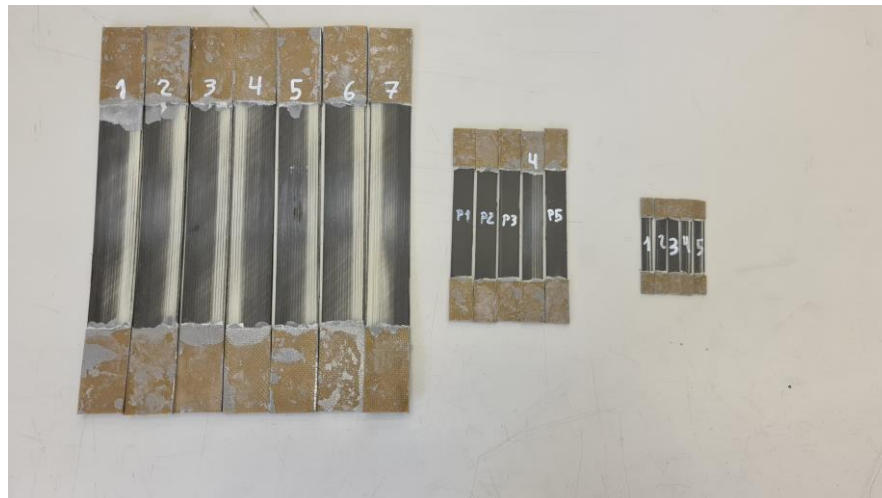


Figura 5-23. Probetas de fibra de vidrio con los tacos pegados

5.4 Ensayos de tracción

Para estos ensayos se ha seguido la norma ASTM D3039 de ensayos de tracción para materiales compuestos de matriz polimérica [31].

5.4.1 Instrumentación y utillaje

Para ejercer la carga en los ensayos se ha utilizado una máquina estática de ensayos Instron modelo 4482 como la que se muestra en la Figura 5-25, con una célula de carga de 100 kN para las probetas grandes y medianas y de 5 kN para las pequeñas. En cuanto a las mordazas, se van a hacer uso de las mostradas en la Figura 5-24 de caras planas, dientes gruesos y una separación entre ellas de 0 a 6mm.



Figura 5-25. Máquina estática de ensayos Instron 4482



Figura 5-24. Mordazas usadas para los ensayos

En cuanto a los métodos para medir las deformaciones se han usado dos: galgas extensométricas y extensómetro.

- **Galgas extensométricas**

Este método para medir las deformaciones se ha usado en todas las probetas de FC y dos de cada uno de los tamaños de las probetas de FV. Estas galgas se han pegado en el centro de todas las probetas llevando a cabo los procedimientos necesarios para una correcta adherencia. Todas las galgas han sido producidas por HBM y se han usado tres tipos:

Para las probetas grandes de vidrio se han usado las galgas 6/120 XY 31 como la que se ve en la Figura 5-26. Esta galga extensométrica permite medir tanto la deformación longitudinal ε_{11} de la probeta como la deformación transversal ε_{22} .

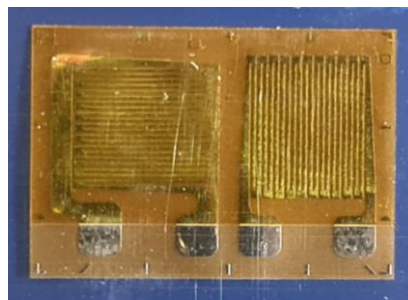


Figura 5-26. Galga 6/120 XY 31

Para las probetas pequeñas tanto de vidrio como de carbono se han usado las galgas 3/120 LY41 como la que se ve en la Figura 5-27. Esta probeta solo permite medir la deformación longitudinal. Se ha usado este tipo de galgas por la limitación de espacio que impedía el uso de una galga que permitiese medir dos direcciones de deformación.

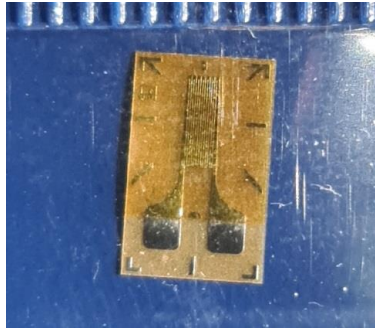


Figura 5-27. Galga 3/120 LY41

Para las probetas grandes y medianas de fibra de FC, así como las probetas medianas de FV se han usado las galgas 3/120 LY41 como la que se ve en la Figura 5-28. Esta galga extensométrica permite medir tanto la deformación longitudinal ϵ_{11} de la probeta como la deformación transversal ϵ_{22} .

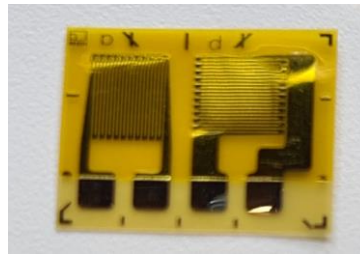


Figura 5-28. Galga extensométrica 3/120 LY41

- **Extensómetro**

Para la medición de las deformaciones en el resto de las probetas de FV y para la de Onyx se ha usado el extensómetro de la Figura 5-29. Este ha sido fabricado por Instron, en concreto es el modelo 2630-112 con una apertura de 50 mm.



5.4.2 Parámetros de ensayo

A continuación, en la Tabla 15 se exponen los parámetros necesarios que aún no se habían expuesto.

Tabla 15. Parámetros de ensayo

Parámetro	Valor o correspondiente
Temperatura	25 °C
Humedad	50 %
Lugar de ensayo	Laboratorio GERM sevilla
Velocidad del ensayo	0,5 / 1 / 2 mm/min
Operador de la máquina	Manuel Mudarra Acebedo

La velocidad del ensayo se ha diseñado de manera que, la velocidad de deformación fuese igual para las 3 probetas, eliminando así la posibilidad de que esta afectase al efecto de escala.

5.4.3 Modelo de ensayo

Para las mediciones de las propiedades mecánicas se ha usado, como ya se ha visto antes, la norma ASTM D3039. Para el tratamiento de resultados de resistencia y rigidez de las probetas estudiadas se van a llevar dos estudios. Primero teniendo en cuenta el tamaño real de la probeta y las propiedades obtenidas de los ensayos. A continuación, se va a realizar un estudio de rigidez y resistencia teórica de la fibra. Para llevar a cabo este procedimiento se va a sustraer al área real el área ocupada por el Onyx. Por otra parte, se plantea el estudio de retirar de manera teórica la resistencia y rigidez ofrecidas por este Onyx en caso de que sea significativo. En la Figura 5-30 se muestra un simple gráfico del proceso que se va a realizar.

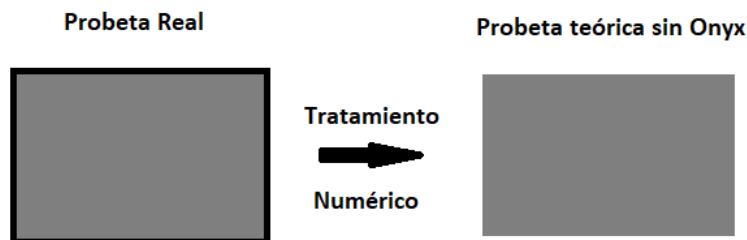


Figura 5-30. Gráfico de cómo se va a eliminar el Onyx numéricamente

Para esta retirada teórica de las capas se ha supuesto que el tamaño real de las fibras en el interior de las probetas es el que indica Eiger en sus impresiones, eliminando así las paredes y superficies de gran rugosidad de Onyx.

- **Ensayo de tracción [33]**

En este ensayo se pretende obtener tanto la rigidez como la resistencia del material de estudio. En este caso se quiere conocer tanto la rigidez longitudinal en la dirección de la fibra E_{11} , el coeficiente de Poisson ν_{12} y su resistencia a tracción X_t . Para ello se posicionan dos galgas extensométricas, una en la dirección de la fibra y otra perpendicular a esta. Con esto se obtiene la deformación longitudinal ε_{11} y transversal ε_{22} , de la probeta durante el ensayo. A continuación, gracias a la máquina de tracción, se somete a la probeta a una fuerza F conocida. De esta manera se obtiene una disposición como la de la Figura 5-31.

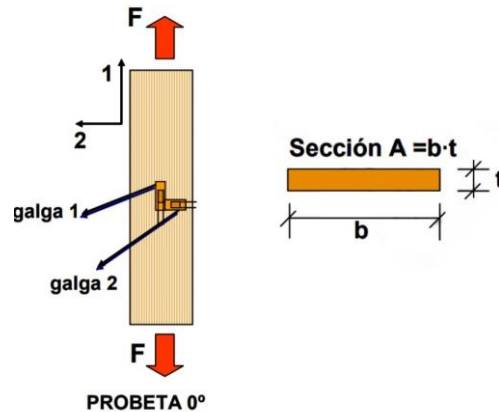


Figura 5-31. Disposición de las galgas y las probetas para determinar la rigidez y resistencia del material [31]

Cuando a la probeta se le aplica una fuerza F , en la zona central de la probeta el tensor de tensiones se hace 0 en todas sus componentes excepto para:

$$\sigma_{11} = \frac{F}{A}$$

Siendo A el área de la probeta $b * t$. Haciendo uso de las ecuaciones constitutivas y las relaciones entre constantes en ejes arbitrarios y en ejes de ortotropía particularizadas para $\theta = 0^\circ$ y despejando se obtiene:

$$E_{11} = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \quad \text{y} \quad \nu_{12} = - \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}$$

Para extraer los datos del ensayo:

$$E_{11} = \frac{\Delta F}{A * \Delta \varepsilon_{11}} \quad \text{y} \quad \nu_{12} = - \frac{\Delta \varepsilon_{22}}{\Delta \varepsilon_{11}}$$

Midiendo estas variables entre 1000 y 3000 $\mu\varepsilon$.

5.5 Resultados

5.5.1 Onyx

En este caso solo se ha ensayado una probeta, mostrada en la Figura 5-33, buscando exclusivamente el Módulo de Young de este material para usarlo en los siguientes estudios y compararlo con el que ofrece Markforged®. En la Tabla 16. Características de la probeta de Onyx se muestran las características de la probeta y el ensayo, y en la Figura 5-34 se representan los resultados obtenidos.

Tabla 16. Características de la probeta de Onyx

Material	Onyx
Patrón de relleno	Solid
Largo	175,23 mm
Ancho	25 mm
Espesor	2,45 mm
Velocidad de ensayo	1 mm/min
Célula de carga	5 kN



Figura 5-33. Probeta de Onyx

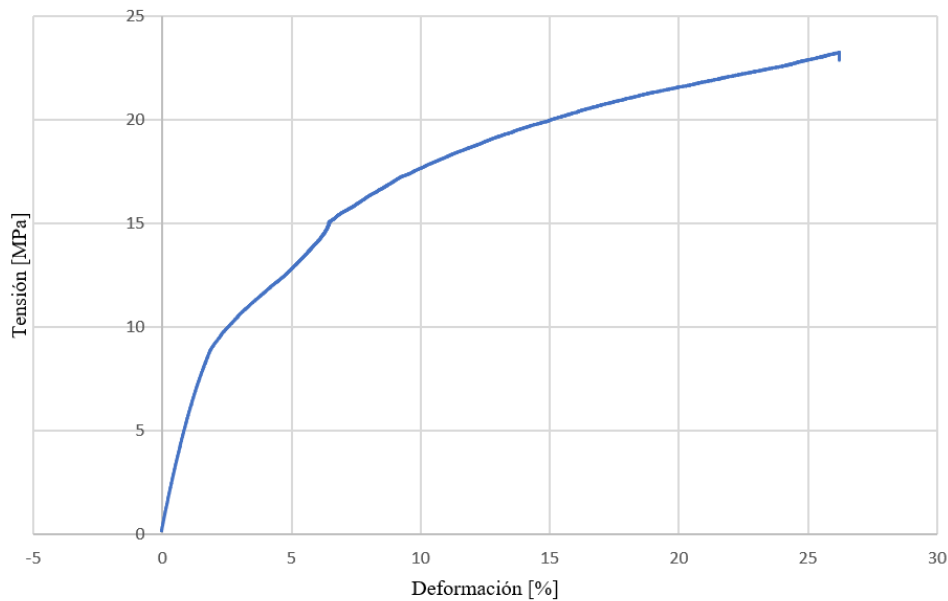


Figura 5-34. Diagrama Tensión-Deformación del ensayo con Onyx

La rigidez al igual que para el resto de las probetas se va a medir entre 1000 y 3000 $\mu\epsilon$. Esto arroja un valor del módulo de rigidez de 0,60 GPa. Este valor es una cuarta parte del valor descrito por el fabricante de 2,4 GPa. Vista esta gran diferencia es importante destacar que esta probeta se ensayó más de 6 meses después de ser impresa, por lo que ha podido absorber humedad, reduciendo así las propiedades del material. Aún así todas las probetas que se van a ensayar esperaron como mínimo tres semanas antes de ensayarse, por lo que el resultado es válido para los intereses del estudio.

A continuación, se va a calcular la resistencia media que puede aportar el Onyx a las probetas tanto de fibra de carbono como a las de vidrio. Primero se va a comenzar con el caso más desfavorable: las de las probetas de fibra de vidrio de tamaño pequeño donde la proporción de Onyx a fibra es la mayor y la deformación en rotura es mayor. Primero hay que calcular el área de este material, para ello sumamos el área de las capas superficiales y la de los muros. Esto arroja un área de $1,78 \text{ mm}^2$. Conociendo esta área, la deformación en rotura y el Módulo de Young del Onyx se determina que en la rotura el Onyx proporciona $\sim 20 \text{ N}$ frente a los $\sim 2000 \text{ N}$ que resiste este tipo de probetas. Por lo tanto, el Onyx representa como máximo el 1 % de la resistencia de las probetas, porcentaje que cae hasta el 0,1 % para las probetas de fibra de carbono grandes.

Además, hay que tener en cuenta que en la mayoría de probetas las capas de Onyx sufren delaminaciones, faltas de material y muros mal impresos. Por ello se decide eliminar del cálculo de la resistencia y rigidez de las probetas las propiedades aportadas por el Onyx por considerarse despreciables.

5.5.2 Probetas de fibra de carbono

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos del ensayo de tracción de todas las probetas de fibra de carbono. Las dimensiones y características de estas probetas se encuentran en los apartados anteriores de este capítulo.

- **Probetas grandes**

Una vez pegadas las galgas se han soldado los cables como se muestra en la Figura 5-35, se ha procedido a los ensayos de tracción de estas probetas.

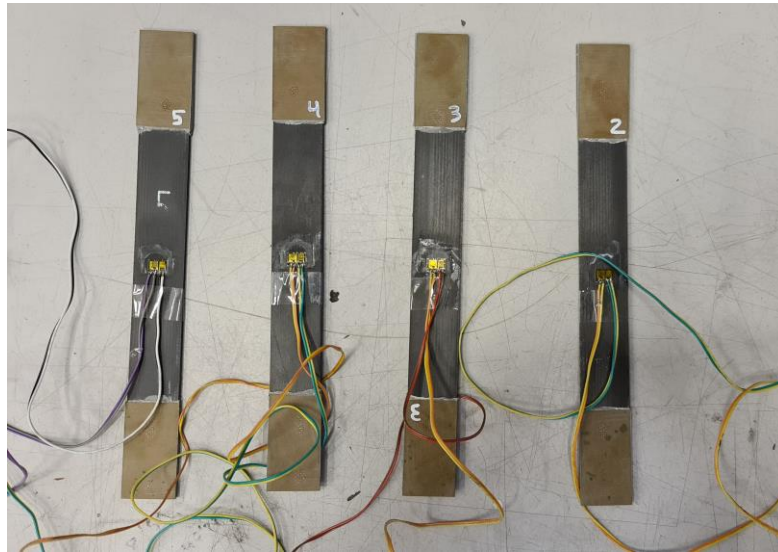


Figura 5-35. Probetas grandes de FC listas para el ensayo

A continuación, en la Tabla 17 y la Figura 5-36 muestran los resultados obtenidos y las gráficas tensión-deformación de estas probetas. Como se puede observar todas las probetas tienen una rigidez muy similar excepto la probeta 3, pudiendo ser causado por una posible delaminación de la zona de Onyx durante el pegado. En las gráficas de las probetas 2 y 5 se pueden observar una gran cantidad de ruido en la medición de las deformaciones. Este error ha sido introducido por una mala conexión o unas galgas extensométricas defectuosas. Es importante destacar que la resistencia media obtenida en este ensayo, así como el de tamaño medio es superior a la dada por el fabricante de 800 MPa. En cuanto las probetas 1 y 3 fallaron a causa de un error en su agarre que se comentará más adelante.

Tabla 17. Resultados experimentales tracción probetas grandes de FC

	X_t [MPa]	X_t [Mpa] sin Onyx	E_{11} [Gpa]	E_{11} [Gpa] sin Onyx	ν_{12}
P1 G*	354,33	417,01	76,92	90,52	0,402
P2 G	758,84	902,97	65,36	77,77	0,428
P3 G*	500,16	587,37	56,92	66,85	0,335
P4 G	752,80	870,68	75,08	86,83	0,491
P5 G	806,61	961,62	64,37	76,74	0,433
Media*	779,71	911,76	67,73	79,74	0,422
Desviación Típica*	38,05	46,10	8,25	9,29	0,057
Coefficiente de Variación (%)*	4,88	5,06	12,18	12,66	13,53

*Los datos de Media, Desviación Típica y Coeficiente de variación se han obtenido dejando fuera las probetas número 1 y 3.

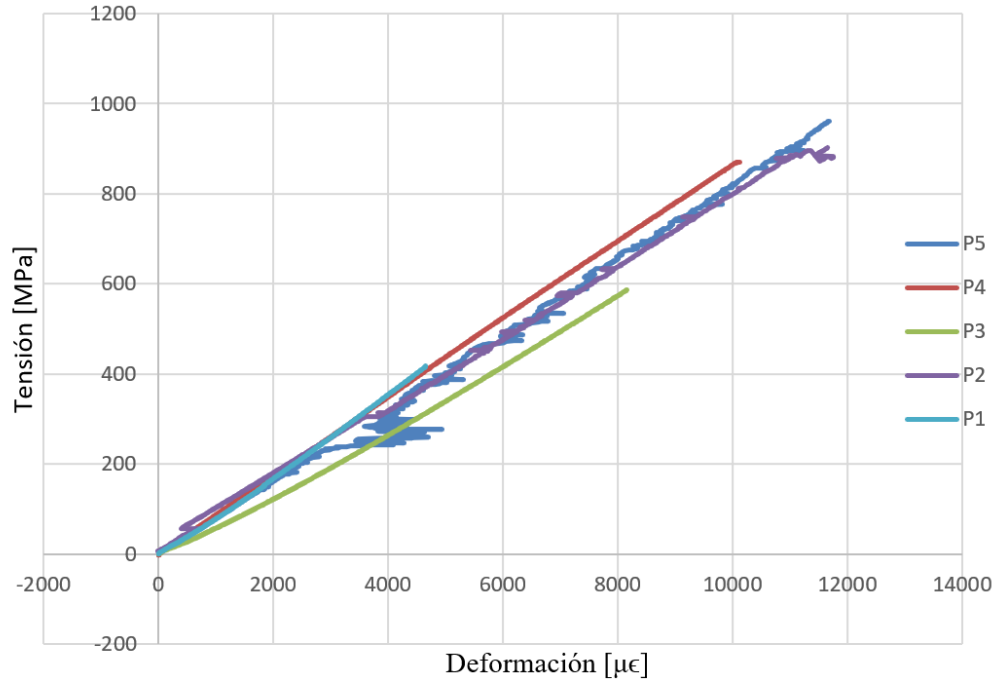


Figura 5-36. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas grandes de FC

El resultado una vez ensayadas las probetas se puede observar en la Figura 5-37. En dicha figura se pueden observar los distintos modos de fallo de cada una de las probetas, siendo aparentemente correctos los de las probetas 2, 4 y 5.

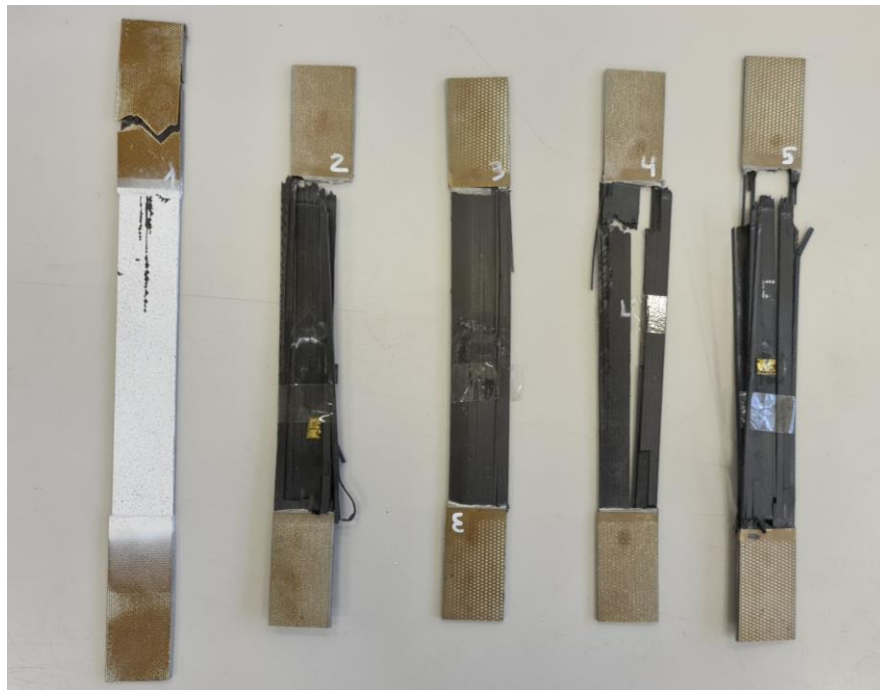


Figura 5-37. Probetas de FC grandes una vez ensayadas

Tanto la probeta 1 como la 3 sufrieron un fallo prematuro a causas de un mal agarre de las mordazas. Como ya se ha visto en este capítulo, al fabricar estas probetas apareció un grave problema de no planitud en los tacos. Esto hizo que en la mordaza solo agarrase a los tacos en una zona de estos, provocando un fallo prematuro en la probeta. En la Figura 5-38 se puede ver como en la probeta 1 las marcas de las mordazas solo están en una zona.

Además, este fallo se produjo en los tacos, invalidando completamente los resultados. A pesar de intentar arreglar este problema lijando los tacos, este problema volvió a aparecer en la probeta 3 por un lijado insuficiente. En la Figura 5-39 se pueden observar estos fallos de agarre con mejor detalle.



Figura 5-38. Detalle del fallo de la P1 grande de FC



Figura 5-39. Detalle del fallo de la P3 grande de FC

- **Probetas medianas**

A estas probetas también se le han lijado los tacos para evitar los errores que han aparecido en las probetas de mayor tamaño. Una vez se han limpiado las probetas, pegado las galgas extensométricas y soldados los cables se obtiene el resultado de la Figura 5-40

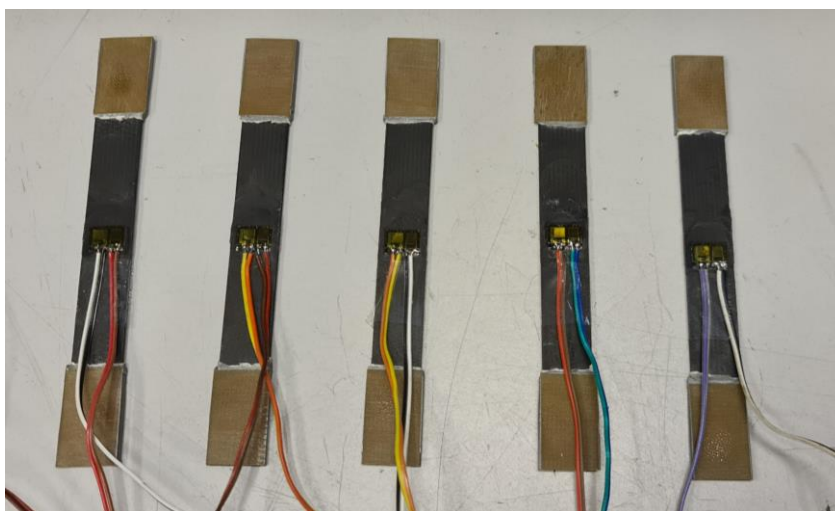


Figura 5-40. Probetas medianas de FC listas para el ensayo

A continuación, en la Tabla 18 y la Figura 5-41 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de tracción junto a la gráfica de tensión deformación.

Durante los ensayos se ha detectado una serie de anomalías. Las probetas 1, 2 y 4 han sufrido fallos en más de una ocasión, comportamiento no esperado en probetas de carbono de 0° unidireccionales. Este comportamiento parece ser a causa de cómo se imprime las propias probetas en la impresora, pero tampoco se puede descartar la opción de fallos en los tacos. También hay que destacar el modo de fallo de las probetas 3, 4 y 5 cerca de los tacos. Este modo de fallo no es adecuado, sin embargo, no se aprecia una reducción de la resistencia en estas probetas. Por ello se procede a tomarlos como buenos. En la Figura 5-42 se pueden ver las probetas tras los ensayos

Otra anomalía son los, extraordinariamente altos, valores de E_{11} arrojados por las probetas 1 y 4 y el ν_{12} de la probeta 5 que se pueden ver en la Tabla 18 y la Figura 5-41. Estas anomalías han podido ser provocadas por una mala colocación de las galgas o tensiones no uniformes, aunque se desconoce la fuente real.

Tabla 18. Resultados experimentales tracción probetas medianas de FC

	X_t [Mpa]	X_t [Mpa] sin Onyx	E_{11} [Gpa]	E_{11} [Gpa] sin Onyx	ν_{12}
P1 M	574,14	796,25	87,39	121,20	0,432
P2 M*	580,34	804,84	-	-	-
P3 M	692,70	910,11	65,09	85,51	0,3528
P4 M	575,69	798,40	81,42	112,92	0,4534
P5 M	724,59	965,25	65,04	86,63	0,625
Media	629,49	854,97	71,97	106,91	0,467
Desviación Típica	73,17	78,04	11,54	18,05	0,115
Coefficiente de Variación (%)	11,62	9,13	14,8	16,88	24,61

*La galga extensométrica de la probeta 2 falló durante el ensayo, por lo que no es posible extraer datos de deformaciones de esta.

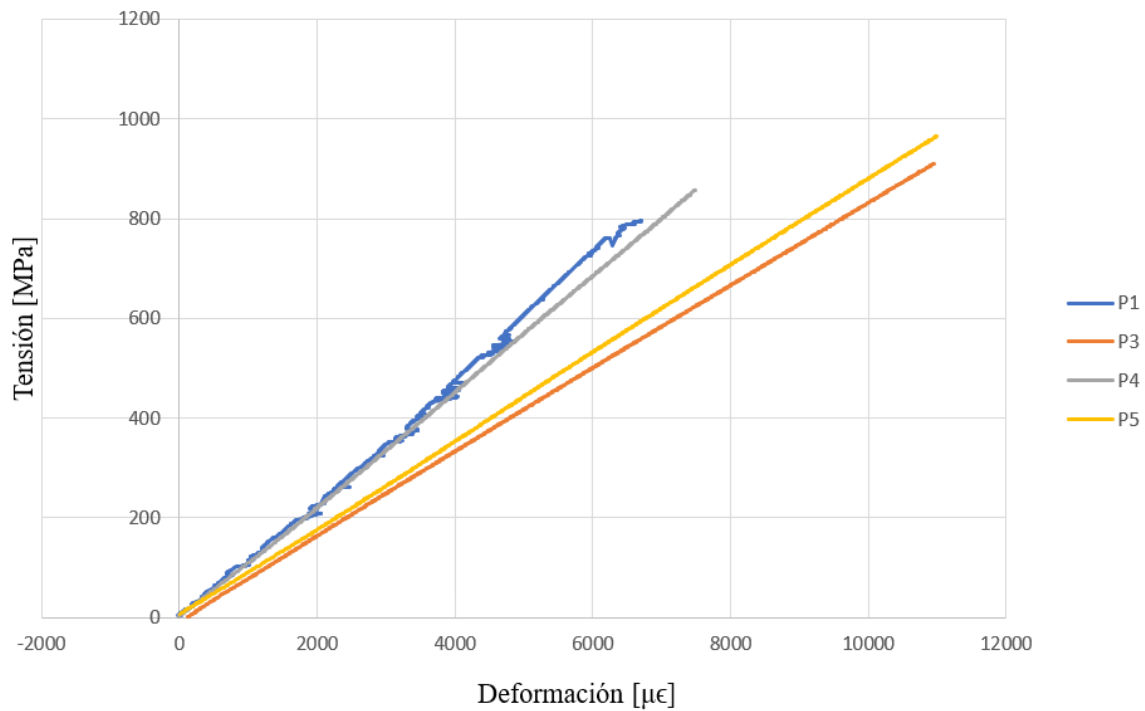


Figura 5-41. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas medianas de FC



Figura 5-42. Probetas de FC medianas una vez ensayadas

- **Probetas pequeñas**

Es muy importante destacar la gran dificultad de realizar el ensayo de tracción de unas probetas tan pequeñas con unas mordazas no dispuestas para ello. Por ello se ha hecho muy difícil la obtención de datos concordantes con las propiedades reales de dichas probetas.

En estas probetas también se ha hecho un lijado preventivo para evitar fallos indeseados. Una vez se han limpiado, pegado las galgas extensométricas y soldados los cables se obtiene el resultado de la Figura 5-43.



Figura 5-43. Probetas pequeñas de FC listas para el ensayo

A continuación, en la Tabla 19 y la Figura 5-44 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de tracción junto a la gráfica de tensión-deformación. En esta gráfica se puede observar que todas las probetas siguen una curva muy similar excepto la n° 5 y la n°6. Estos comportamientos parecen haber sido provocado por una mal adhesión de las galgas o algún tipo de delaminación al principio del ensayo. Sin embargo, una vez pasadas las primeras 3000 $\mu\epsilon$ el comportamiento pasa a ser idéntico al del resto de probetas.

Tabla 19. Resultados experimentales tracción probetas pequeñas de FC

	X_t [MPa]	X_t [MPa] sin Onyx	E_{11} [GPa]	E_{11} [GPa] sin Onyx
P1 P	494,66	826,45	44,97	75,14
P2 P	558,58	859,35	57,70	88,77
P3 P	570,81	939,65	48,18	79,32
P4 P	458,86	827,36	46,50	83,85
P5 P	567,91	941,15	45,33*	75,12
P6 P	458,42	811,06	63,35	112,08
Media	518,29	867,50	51,01	85,71
Desviación Típica	50,57	57,78	5,27	5,89
Coefficiente de Variación (%)	9,76	6,66	10,34	6,87

*En la probeta pequeña 5 se ha medido E_{11} desde 3000 a 5000 $\mu\epsilon$, ya que parece haber un gran error de 1000 a 3000 $\mu\epsilon$.

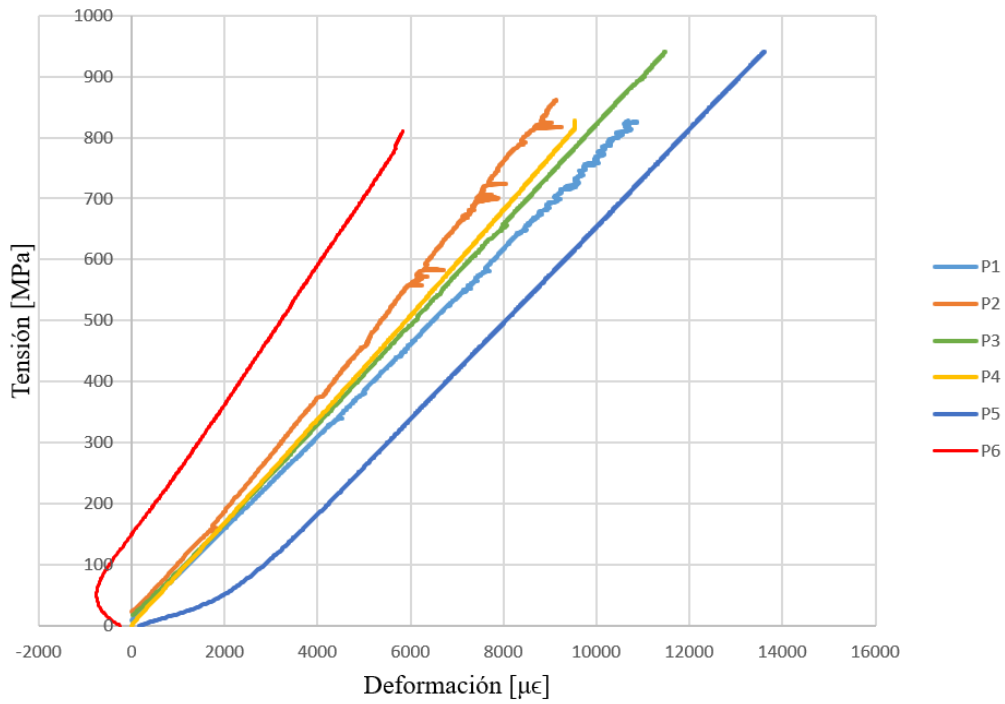


Figura 5-44. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas pequeñas de FC

Como se ve en la Figura 5-45 la única probeta cuyo modo de fallo es el esperado en una probeta de fibra de carbono es la n° 5. El resto ha tenido una rotura parcial cerca de los tacos.



Figura 5-45. Probetas de FC pequeñas una vez ensayadas

5.5.3 Probetas de fibra de vidrio

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos del ensayo de tracción de todas las probetas de FV. Las dimensiones y características de estas probetas se encuentran en los apartados anteriores de este capítulo.

En este caso no ha sido necesario el lijado de los tacos en ninguna de las probetas, ya que se modificó el método de pegado como se vio con anterioridad. Una vez se han limpiado las probetas, pegado las galgas extensométricas y soldados los cables se obtiene el resultado de la Figura 5-46. Es importante destacar que solo las probetas mostradas en esta figura se han ensayado con galgas extensométricas. Para el resto se ha hecho uso de un extensómetro o para las más pequeñas no se han medido.

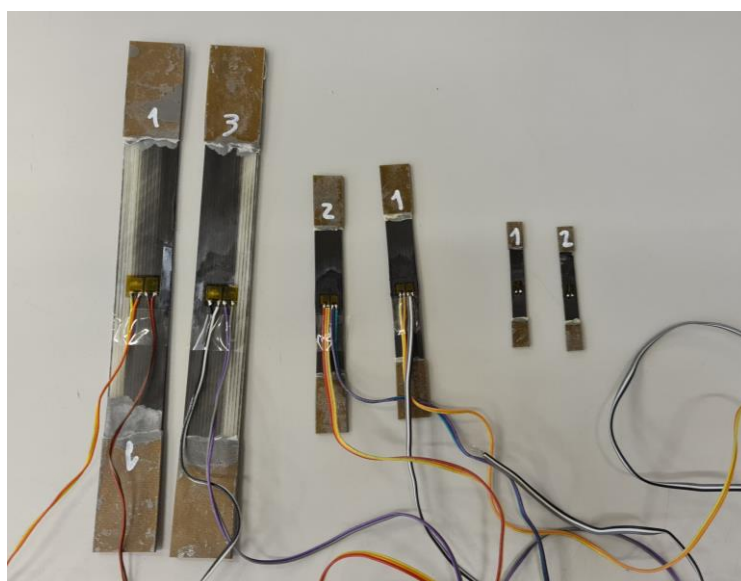


Figura 5-46. Probetas de FV listas para el ensayo de tracción

- **Probetas grandes**

A continuación, en la Tabla 20 y la Figura 5-47 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de tracción junto a la gráfica de tensión deformación. En este ensayo se puede observar una dispersión muy baja tanto de los valores de resistencia como de los de rigidez. En cuanto a las propiedades de resistencia son mayores a las dadas por el fabricante, el cual anuncia una resistencia a la tracción de 590 MPa para este tipo de fibras.

Es importante destacar que el final de las gráficas de las probetas 2 ,6 y 7 no son reales. Al tener que retirarse el extensómetro para evitar no dañarlo no se tiene información de las deformaciones en esa zona. Para evitar que la gráfica no fuese concordante a la tabla se han tabulado unas deformaciones ficticias estimadas.

Tabla 20. Resultados experimentales tracción probetas grandes de FV

	X_t [MPa]	X_t [MPa] sin Onyx	E_{11} [GPa]	E_{11} [GPa] sin Onyx	ν_{12}
P1 G	541,41	625,61	23,09	26,68	0,356

P2 G	560,70	638,52	21,22	24,18	-
P3 G	577,75	678,50	24,71	29,02	0,368
P4 G	592,24	691,94	-	-	-
P5 G	533,90	627,00	20,7942	24,42	-
P6 G	589,35	681,64	22,48	26,00	-
P7 G	490,19	566,96	21,85	25,28	-
Media	555,08	644,31	22,36	25,75	0,362
Desviación Típica	24,64	30,05	1,56	2,26	0,008
Coefficiente de Variación (%)	4,44	4,66	6,99	8,78	2,34

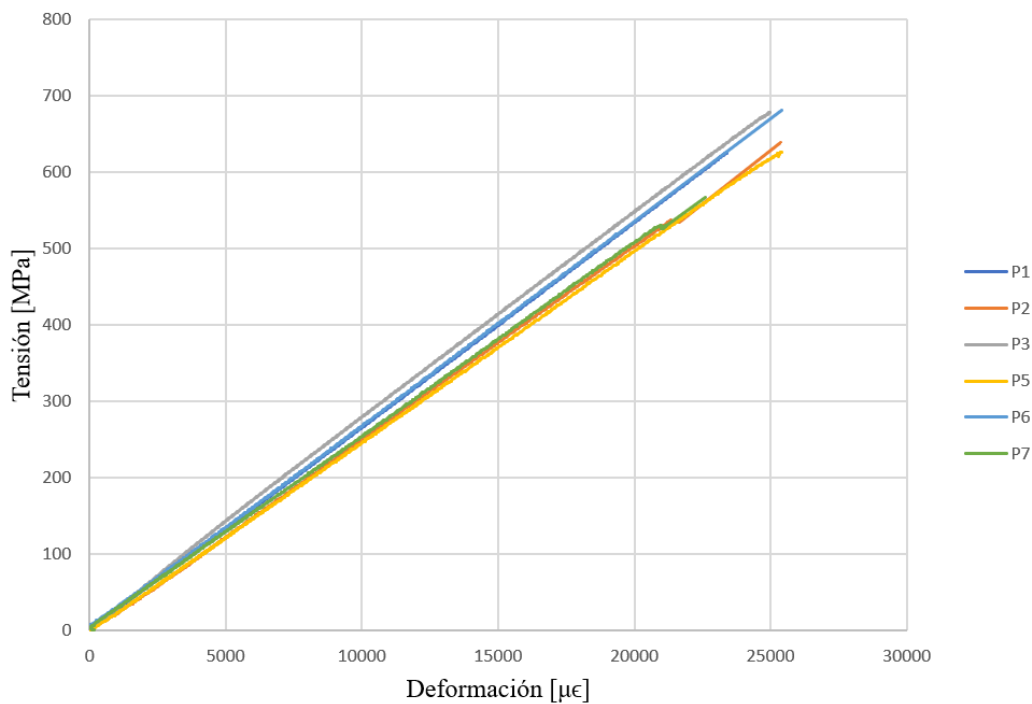


Figura 5-47. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas Grandes de FV

En este caso todas las probetas han fallado de un modo muy similar. Una vez comenzaba la rotura, grupos de fibras se rompían consecutivamente en un intervalo de entre 1 y 2 segundos. El resultado de estos ensayos se puede ver en la Figura 5-48 y la Figura 5-49.



Figura 5-48. Ensayo de tracción de una probeta grande de FV



Figura 5-49. Probetas de FV grandes una vez ensayadas

- **Probetas medianas**

A continuación, en la Tabla 21 y la Figura 5-50 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de tracción junto a la gráfica de tensión deformación. En este caso existe dispersión de valores de E_{11} , sin embargo los valores de resistencia a la tracción siguen siendo constantes, con un coeficiente de variación de menos del 5 %.

Tabla 21. Resultados experimentales tracción probetas medianas de FV

	X_t [MPa]	X_t [MPa] sin Onyx	E_{11} [GPa]	E_{11} [GPa] sin Onyx	ν_{12}
P1 M	635,81	742,55	27,63	32,265	0,30
P2 M	555,54	703,96	24,16	30,61	0,338
P3 M	544,05	675,10	-	-	-
P4 M	531,35	659,35	20,30	25,20	-
P5 M	574,75	713,19	20,53	25,47	-
Media	568,3	698,83	23,16	28,39	0,319
Desviación Típica	40,97	32,66	3,47	3,59	0,027
Coefficiente de Variación (%)	7,20	4,67	14,98	12,64	8,42

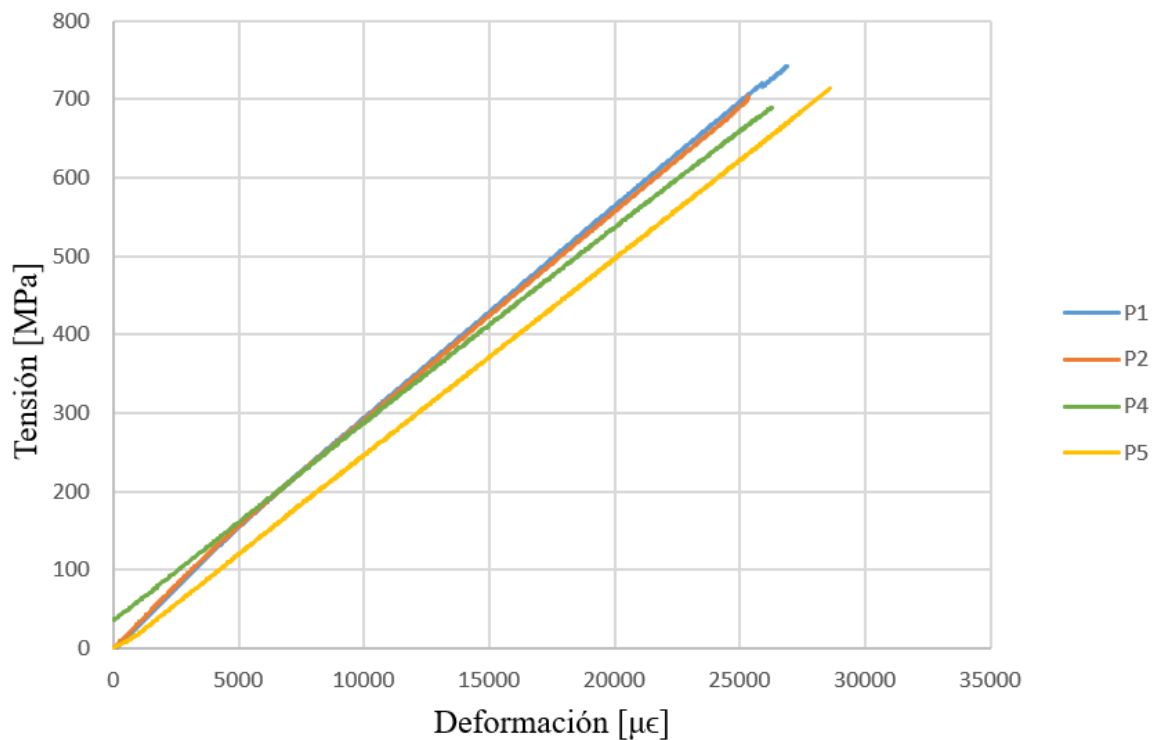


Figura 5-50. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas medianas de FV

Al igual que con las probetas de FV grandes no se ha observado ninguna anomalía con esta tanda de probetas. El modo de fallo de todas ellas ha sido muy similar tanto entre ellas como a las de gran tamaño. El resultado de los ensayos lo podemos ver en la Figura 5-51. Esto lleva a pensar que hay una alta probabilidad de que los ensayos realizados en estos dos grupos de probetas sean una fiel representación de la realidad.



Figura 5-51. Probetas medianas de FV una vez ensayadas

- **Probetas pequeñas**

Es muy importante destacar de nuevo la gran dificultad de realizar el ensayo de tracción de unas probetas tan pequeñas con unas mordazas no dispuestas para ello. Además, a diferencia de las de FC, estas probetas son mucho más flexibles. Esto hace que sea aún más difícil alinear correctamente las probetas y evitar cualquier daño derivado de esto.

A continuación, en la Tabla 22 y la Figura 5-52 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de tracción junto a la gráfica de tensión deformación. En este caso solo se ha obtenido el valor de rigidez de dos de las probetas al ser demasiado pequeñas para la utilización del extensómetro y no disponer de más galgas extensométricas del modelo necesario.

En estas probetas sí han aparecido anomalías durante el ensayo. Primero, el modo de fallo de todas las probetas excepto la 5 ha sido distinto al resto de probetas de tamaños superiores. Además, la probeta 1 durante el ensayo parece no haber estado alineada correctamente. Otra anomalía a destacar es la pendiente descendente de estas gráficas a diferencia del resto de probetas ensayadas. Esto podría pensarse que es causado por el Onyx ya que su rigidez desciende a medida que avanza el ensayo de tracción como se ha visto antes. Sin embargo, en el rango de deformaciones en el que se mueven estas probetas es prácticamente constante y aunque no lo fuese, su impacto sería mucho menor. Es por ello que se desconce la fuente de esta anomalía. En la Figura 5-53 se observa el resultado de estos ensayos.

Tabla 22. Resultados experimentales tracción probetas pequeñas de FV

	X_t [MPa]	X_t [MPa] sin Onyx	E_{11} [GPa]	E_{11} [GPa] sin Onyx
P1 P	322,16	495,63	29,00	44,62
P2 P	513,55	632,66	31,55	38,83
P3 P	223,17	329,62	-	-
P4 P	450,60	705,72	-	-
P5 P	427,52	657,72	-	-
Media*	428,46	622,93	30,28	41,73
Desviación* Típica	79,65	90,12	1,80	4,09
Coefficiente de Variación (%)*	18,59	14,47	5,96	9,81

*Para el cálculo de estos valores no se ha tenido en cuenta la probeta nº 1.

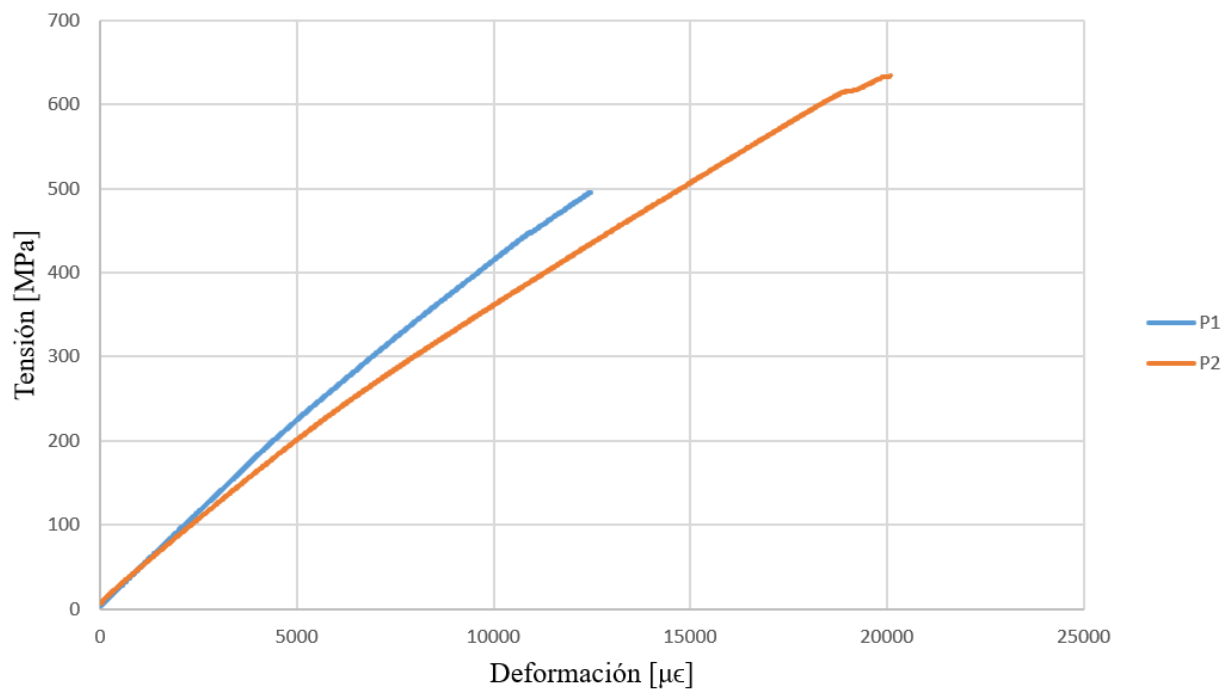


Figura 5-52. Diagrama Tensión-Deformación de las probetas pequeñas de FV



Figura 5-53. Probetas pequeñas de FV una vez ensayadas

5.5.4 Efecto escala

A continuación, se van a exponer los datos obtenidos referidos al efecto escala en materiales compuestos fabricados con la impresora Mark Two[®]. Para los estudios del efecto escala tridimensional solo se va a tener en cuenta la resistencia teórica de la fibra sin Onyx.

- **Probetas de fibra de carbono**

En la Tabla 23 y la Figura 5-54 se pueden observar los resultados obtenidos en estos ensayos para las probetas de fibra de carbono. Es importante destacar la escala en la que están representados ambos valores. La diferencia entre un valor y otro del eje de ordenadas es muy pequeña y en el eje de abscisas estas diferencias son enormes.

Tabla 23. Volumen y resistencia media a la tracción de las probetas de FC

Tipo de probeta	Volumen de fibra ensayado [mm^3]	Resistencia media [MPa]
Pequeña FC	130	867,50
Mediana FC	1096	854,97
Grande FC	8992	911,76

Si se grafican estos 3 puntos en una escala logarítmica se obtiene:

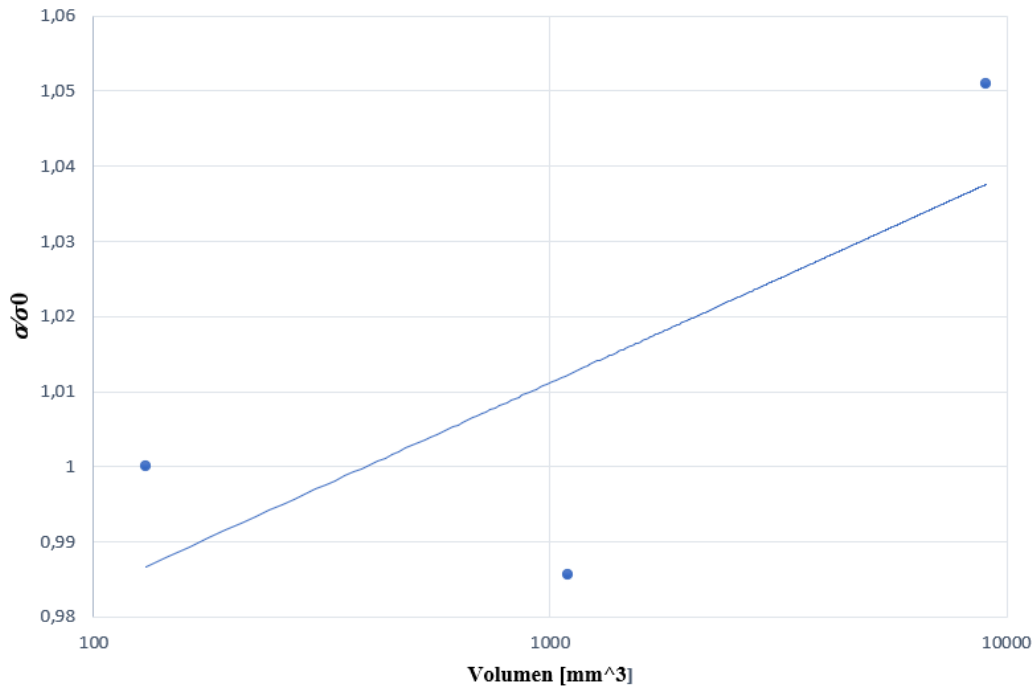


Figura 5-54. Representación logarítmica de la resistencia de las probetas de FC frente a su volumen

Como se puede observar en este caso los ensayos arrojan un aumento de la resistencia del 5,1 % al aumentar el volumen de la probeta más pequeña a la más grande. Sin embargo, esta tendencia no es constante a través de las 3 configuraciones, disminuyendo primero para la de tamaño medio.

Si aplicamos la teoría de Weibull a los datos obtenidos:

$$m = -\frac{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{\ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)} = -85,14$$

Se obtiene un módulo de -85. Este resultado no es concordante con esta teoría. Sin embargo, podría esperarse si se tienen en cuenta los resultados obtenidos por M. Kawai en el artículo [18]. En dicho artículo se encontró una relación positiva entre el volumen total de la probeta unidireccional de carbono y su resistencia.

- **Probetas de FV**

En la Tabla 24 y la Figura 5-55 se pueden observar los resultados obtenidos en estos ensayos para las probetas de FV. Es importante destacar que la diferencia entre un valor y otro del eje de ordenadas es muy pequeña y en el eje de abscisas estas diferencias son enormes.

Tabla 24. Volumen y resistencia media a la tracción de las probetas de FV

Tipo de probeta	Volumen de fibra ensayado [mm^3]	Resistencia media [MPa]
Pequeña FV	130	657,72
Mediana FV	1096	698,83
Grande FV	8992	644,31

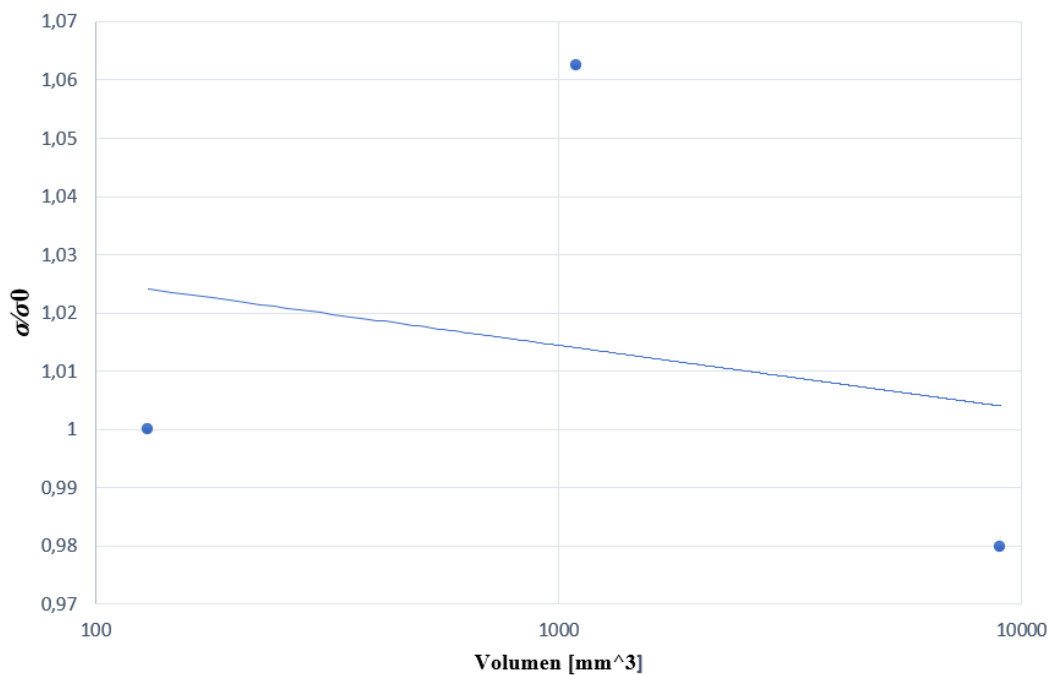


Figura 5-55. Representación logarítmica de la resistencia de las probetas de FV frente a su volumen

Como se puede observar, en este caso los ensayos arrojan una reducción de la resistencia del 2 % al aumentar el volumen de la probeta más pequeña a la más grande. Sin embargo, esta tendencia no es constante a través de las 3 probetas, aumentando considerablemente para la de tamaño medio. Si se aplica la teoría de Weibull en este caso se obtiene un Módulo de Weibull de:

$$m = -\frac{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{\ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)} = 205,67$$

Cabe destacar una vez más el problema de los ensayos con las probetas muy pequeñas. Esta dificultad ha podido afectar negativamente a la resistencia de las probetas de este tamaño. Sin embargo, para los ensayos tamaño grande y mediano no existieron este tipo de problemas. Además, los modos de fallo entre los dos tamaños son idénticos, por lo que se va a realizar un estudio a parte teniendo en cuenta estos dos tamaños, cuyos resultados se pueden observar en la Figura 5-56. Cabe destacar de nuevo que la diferencia entre un valor y otro del eje de ordenadas es muy pequeña y en el eje de abcisas estas diferencias son enormes.

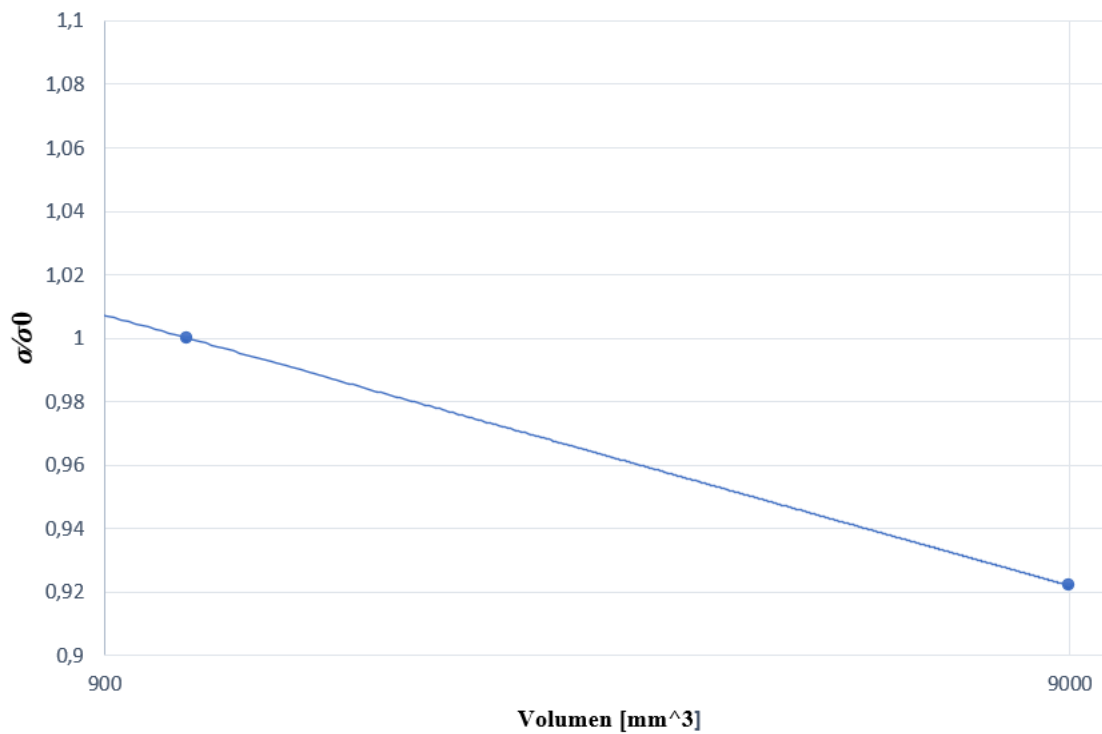


Figura 5-56. Representación logarítmica de la resistencia de las probetas mediana y grande de FV frente a su volumen

En este caso se obtiene un Módulo de Weibull de:

$$m = -\frac{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{\ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)} = 26,25$$

En este caso se observa una reducción en la resistencia del 7,8 %, un efecto considerablemente más marcado que el anteriormente observado con el conjunto de las tres probetas. Si se aplica la teoría de Weibull en este caso se obtiene un Módulo de Weibull de 26,25. Este resultado es el primero concordante con el comportamiento observado por M.R. Wisnom en 1999 [34].

Capítulo 6: RECOMENDACIONES Y FALLOS DE IMPRESIÓN

En este apartado se van a describir los errores más importantes ocurridos con la impresora durante el desarrollo del trabajo fin de grado. Algunos de los errores ya se han descrito, pero se indagará más en ellos.

- **Fallo de una pieza del extrusor**

Durante la impresión de una de las probetas se atascó la fibra dentro de la boquilla del cabezal de impresión. Esto provocó una desconexión entre tubo pieza del cabezal de impresión, provocando que la fibra no pudiese extruirse. Al no poder salir por el cabezal comenzó a salir por la parte superior de la impresora. Este fallo se dio cuando estaba trabajando la impresora sola y la fibra se enrolló dentro de esta como se ve en la Figura 6-1 y la Figura 6-2.



Figura 6-1. Fallo de la impresora al separarse el cabezal el tubo del cabezal de extrusión.

Para arreglarlo momentáneamente se pegó el tubo a la pieza de nuevo, pero es necesario su sustitución. El precio de esta pieza ronda los 70 € +IVA. Además, al ser una pieza prioritaria hubo que esperar más de 4 meses para recibirla. Por ello se recomienda tener al menos una de cada pieza de repuesto que se nombra en el manual de impresión.

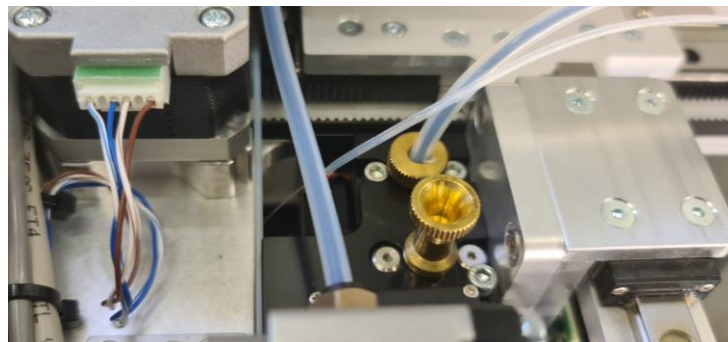


Figura 6-2. Desprendimiento del tubo del cabezal de impresión

- **Onyx húmedo**

Tras el cambio de un rollo de Onyx por otro se comenzó a acentuar un problema que ya acarrearba la impresora con anterioridad. Cuando la impresora dejaba de imprimir Onyx, ya sea porque estaba cambiando de fibra a Onyx, de una pieza a otra o de capa, aparecían unos hilos de Onyx tanto en la pieza como en la cámara de impresión. Este problema se acentuó y en aquel momento incluso cuando no se estaba imprimiendo Onyx el cabezal comenzaba a gotear cómo se ve en la Figura 6-3. Esto afectaba muy negativamente a las piezas, ya que podían aparecer numerosas inclusiones, fallos de la deposición de fibra etc. Era muy importante el arreglo de este problema, ya que evitaba que se puedan fabricar piezas de gran tamaño y obliga a estar pendiente de la impresora constantemente durante la impresión.

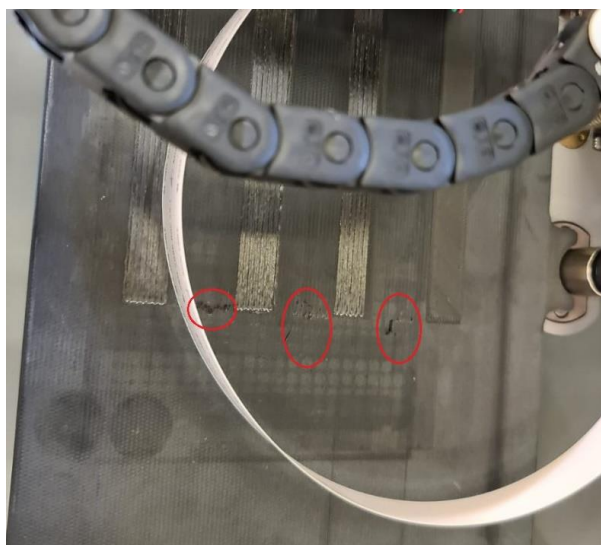


Figura 6-3. Hilos y defectos depositados por la máquina a causa del plástico mojado

Se ha comunicado el problema con el servicio técnico de Markforged®, y se ha determinado que el origen del fallo era el plástico mojado. Parece ser que la bolsa sellada dónde venía el polímero en el último pedido tenía un pequeño agujero, según comentan aquellas personas que lo recibieron, por donde muy probablemente haya entrado humedad. Es muy importante por tanto asegurar que el embalaje del plástico en el que vienen las bobinas este en perfectas condiciones a la llegada de este para tener la certeza que el Onyx no esté mojado.

- **Delaminación de la capa externa de Onyx**

Durante la fabricación de las probetas con refuerzo se han producido numerosos problemas de delaminaciones de la capa externa de Onyx, cómo se muestra en la Figura 6-4. Este hecho, aunque no afecte muy significativamente a las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas, les da un acabado muy pobre y una variabilidad dimensional muy grande. Es por ello que se recomienda dejar las 4 capas de superficie de Onyx recomendadas por Eiger en la mayoría de las aplicaciones. Es importante destacar que este problema suele aparecer en la capa de Onyx en contacto con la cama de impresión, por lo que es muy importante asegurarse de no dañar el fino plástico con la espátula a medida que se retira la pieza de la cama.

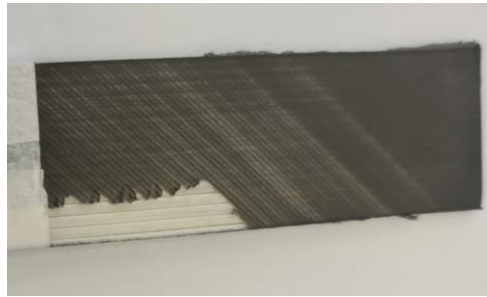


Figura 6-4. Delaminaciones de la capa de Onyx en una probeta de fibra de vidrio

- **Efecto dominó**

Durante el transcurso de este trabajo en múltiples ocasiones y sin la intervención de ningún fallo mecánico de la máquina, la impresora ha errado en su impresión. Este error en muchas ocasiones no se aísla solo a una zona de la pieza. A medida que este error deforma la pieza, desplaza el cabezal de impresión y acumula una gran cantidad de errores nuevos generando un efecto dominó. En cuestión de minutos esto puede arruinar no solo la pieza dónde se originó el error, si no todas las piezas que se estén imprimiendo en ese momento como ocurrió en la Figura 6-5.



Figura 6-5. Error grave de impresión generado por un efecto dominó

- **Deformaciones residuales severas en las probetas de fibra de vidrio**

Como ya se ha visto con anterioridad, todas las probetas de fibra de vidrio tienen deformaciones residuales. En ciertos casos estas son muy importantes, como se ve en la Figura 6-6. Se observa que este efecto aumenta a medida que se incrementa la cantidad de fibra usada. Este fenómeno no se ha visto solo en las probetas estudiadas en este trabajo. A medida que se fabricaban estas probetas otra persona del departamento también estaba imprimiendo piezas con un refuerzo de fibra de vidrio. Estas piezas, a pesar de tener un refuerzo de fibra de vidrio mucho más ligero también tenían deformaciones residuales.

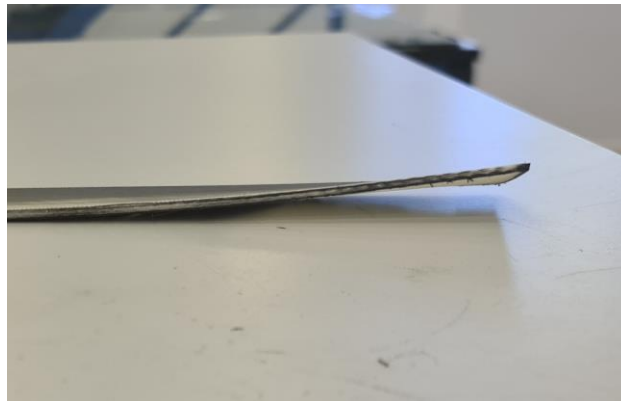


Figura 6-6. Detalle de la deformación residual presente en la probeta grande de vidrio n° 7

Por ello se recomienda el uso de la fibra de vidrio para casos donde no sea un material dominante. En caso contrario la pieza fabricada probablemente tendrá unas deformaciones residuales muy importantes que imposibiliten la utilización de la pieza para lo que fue diseñada.

- **Nivelación para piezas grandes**

Al imprimir piezas grandes, cuya planta se acerque a los extremos de la cama de impresión, es muy probable que cerca de los bordes la pieza no se imprima correctamente por una mala nivelación. Este fenómeno se da a pesar de nivelar la cama de impresión con el método indicado por Markforged®. Por ello es muy recomendable al imprimir este tipo de piezas estar pendientes de la primera capa de Onyx, ya que un error de impresión en esta es un indicativo de la nivelación de la cama. En caso de que esta capa se imprima demasiado fina o con mucha rugosidad basta con ajustar ligeramente la cama y volver a probar hasta eliminar el problema.

- **No aviso de errores**

Es muy importante destacar que la impresora Mark Two® no tiene la capacidad de detectar la inmensa mayoría de errores que se dan durante la impresión, incluyendo los de este apartado. Tampoco tiene la capacidad de detectar la falta de material en caso de que no se haya realizado un meter load, es decir, una carga del material pesando la bobina e introduciendo su peso en la impresora.

Estos errores pueden producir fallos permanentes, roturas y desgastes en la impresora sin que esta sea capaz de reaccionar. Esto es si quiera más importante si se tiene en cuenta que es una impresora 3D, la cual está diseñada para trabajar de forma autónoma durante la impresión.

Capítulo 7: CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado se ha llevado a cabo, en primer lugar, un estudio de la tecnología de fabricación aditiva y su aplicación en numerosas industrias. A su vez se ha hecho un repaso del efecto escala y sus implicaciones en las características de los materiales compuestos. Por otra parte, se ha realizado una revisión de las opciones que ofrece la impresora Mark Two[®] junto a sus mejoras generacionales respecto a la impresora Mark One[®]. Una vez comprendida la impresora se ha llevado a cabo un estudio en profundidad del programa Eiger para entender cómo el diseño en este programa se traduce a las propiedades de las piezas impresas. Usando los conocimientos obtenidos en los estudios previos y basándose en las normas pertinentes se ha realizado una caracterización de las propiedades a tracción de la fibra de carbono y de vidrio que están disponibles para la impresora Mark Two[®]. Estos más de 30 ensayos se han usado para cuantificar el efecto escala en los materiales compuestos fabricados con esta impresora. Una vez concluida la parte experimental se han dispuestos los principales errores enfrentados durante la impresión y las recomendaciones para evitarlos basados en la experiencia. Por último, en este capítulo se expondrán las conclusiones extraídas de este proyecto junto a los desarrollos futuros de las investigaciones llevadas a cabo.

7.1 Conclusiones derivadas de la fabricación aditiva con la impresora Mark Two[®]

En primer lugar, cabe destacar las numerosas mejoras respecto a la impresora predecesora Mark One[®]:

- Predicción excelente de los tiempos de fabricación. Esta mejora ha permitido ajustar las impresiones con una precisión muy superior a lo que era posible en la impresora Mark One[®]. Gracias a esto un grupo de 3 personas han sido capaces de componer sus impresiones durante el día.
- Capacidad de imprimir fibra de carbono con un ángulo de 180°. Esta mejora es, sin duda, uno de los mayores avances en esta edición de la impresora. Gracias a esta característica se han podido imprimir todas las probetas de fibra de carbono directamente sin necesidad de corte ni preparación. Además, hace posible la utilización de este tipo de fibra para casi cualquier pieza y configuración.
- Mejor acabado superficial. Las probetas y piezas fabricadas con esta impresora poseen un acabado superficial superior a las fabricadas con la antigua impresora.
- Eliminación de la espátula para limpiar las boquillas de la impresora.

Aun habiendo mejorado considerablemente respecto a la anterior la impresora Mark Two[®] tiene numerosos aspectos a mejorar.

En primer lugar, cabe destacar la tecnología de la que carece esta impresora, que se puede encontrar en impresoras 3D de un precio mucho más reducido a esta. Entre ellas tenemos la falta de una nivelación automática. Para nivelar esta impresora es necesario el uso de unas pletinas e ir ajustando tanto la altura de la cama de impresión como la de las boquillas de extrusión manualmente, tarea que ya realizan automáticamente impresoras con un precio 50 veces inferior. Otro factor del que carece esta impresora es de un sistema de parado en caso de que la impresión comience a fallar. Ya sea por falta de material, por una impresión incorrecta, por una desconexión de un tubo, la impresora no dejará de imprimir hasta acabar la pieza. Esto puede provocar la pérdida de tiempo, dinero, material e incluso traducirse en un fallo mecánico de la impresora. Esta falta de autonomía reduce mucho el atractivo de la impresión 3D ya que en algunas situaciones se hace obligatorio que haya una persona pendiente de la impresora mientras esta está fabricando una pieza.

Como ya se ha comentado, los precios del material, repuestos y la impresora son extraordinariamente altos. La impresora tiene de base un coste de más de 18000 € antes de impuestos, una bobina de fibra de carbono puede costar hasta 450 € y un tubo de unión con un pequeño cabezal más de 80 €. Estos altos precios vienen acompañados además de un tiempo largo de entrega, ya que la empresa es estadounidense y toda su fabricación se concentra en dicho país. Estos precios, junto a la oferta de materiales disponible podría mejorar considerablemente si algunas empresas externas comenzasen a fabricar tanto piezas como materiales para la impresora.

Otro aspecto vital a tener en cuenta en la impresora es el programa Eiger. En dicho programa se le otorgan todas las propiedades a las piezas antes de imprimirlas y permite al control de numerosos parámetros. Este programa está claramente diseñado para facilitar su utilización a las personas poco familiarizadas con los materiales compuestos y permitir algunas modificaciones a medida que aumenta el conocimiento en el programa. Es importante destacar que la colocación automática de fibra funciona rápida y correctamente. Sin embargo, a medida que se desean variar más parámetros de impresión se hace más complejo y en muchas ocasiones imposible. Es por ello que sería de gran interés disponer de un programa diseñado para proyectos de investigación con una programación a un nivel más bajo que permitiese la modificación de muchos más parámetros.

En cuanto a los materiales disponibles y sus características mecánicas son considerablemente inferiores tanto las de rigidez como las de resistencia mecánica a los de los materiales compuestos convencionales. Las piezas impresas con esta tecnología tienen una cantidad de huecos mucho mayor a los de los compuestos convencionales y las fibras usadas en estos son distintas. A pesar de esta reducción clara de propiedades hay que tener en cuenta que esta impresora no intenta competir con los materiales compuestos convencionales, si no con otras impresoras de plásticos y ciertas piezas de aluminio. Las piezas reforzadas con fibra de carbono tienen una resistencia a la tracción de casi el doble comparada con una pieza de aluminio 7075 T6 y menos de la mitad de peso. Es por esta razón por la que la impresora Mark Two[®] sobresale sobre otros métodos de fabricación. Aún así estos materiales tienen ciertos inconvenientes, principalmente la fibra de vidrio y el polímero de Nylon. Las probetas reforzadas con fibra de vidrio tienden a tener unas grandes deformaciones residuales que pueden afectar muy negativamente a la estabilidad dimensional de la pieza. Por otra parte, las propiedades mecánicas del Nylon y el Onyx son considerablemente inferiores a otros polímeros como el PEEK, además de ser hidrofílicos. La posible sustitución de este material por otro con mejores propiedades mecánicas sería un avance muy significativo para esta impresora.

En conclusión, la impresora Mark Two[®] puede ser útil en ciertas situaciones dónde es necesaria una fabricación rápida y sencilla con materiales compuestos para tamaños reducidos. Sin embargo, una tecnología no muy desarrollada, ciertos fallos de impresión y unos precios muy altos, tanto fijos como de operación, hacen que su compra sea una decisión difícil de justificar tanto para una empresa como para un particular.

7.2 Conclusiones derivadas del estudio del efecto escala

En los estudios derivados del efecto escala en materiales compuestos con la impresora Mark Two[®] se han obtenido dos tendencias, una de resistencia ligeramente creciente con el volumen de fibra de carbono y otra resistencia ligeramente decreciente con el volumen de fibra de vidrio. Hay que tener en cuenta la variabilidad presente por ciertas deficiencias en el método de fabricación, en el propio material fabricado por la impresora y por la utilización de un utillaje no preparado para unas probetas de un tamaño tan reducido. Estos factores externos a las propiedades del material han podido enterrar las diferencias reales del efecto escala.

Sin embargo, es importante destacar el último estudio realizado en el apartado 5.5.4 con las probetas de vidrio grandes y medianas. Ambos grupos de probetas presentan modos de fallo idénticos, tienen un tamaño adecuado para los útiles de ensayo y no presentan ningún error de fabricación. En este estudio se puede observar una clara disminución de la resistencia de las probetas de fibra de vidrio con un aumento en su tamaño.

7.3 Desarrollos futuros con la Impresora Mark Two®

Existen numerosas vías de investigación muy interesantes no estudiadas en este trabajo, ni en los precedentes para las propiedades de los materiales disponibles en esta impresora:

- Ensayo de tenacidad de fractura interlaminar.
- Ensayo de tracción a través de taladro aprovechando el *Inner Ring* de Eiger.
- Determinación de las características del material perpendicular a la impresora (E_{33}).
- Fabricación de probetas para un ensayo de impacto.
- Ensayos de fatiga en los materiales disponibles.
- Fabricación de probetas de Kevlar® para determinar sus propiedades (tracción, compresión ...).
- Ensayos a bajas y altas temperaturas.
- Ensayo de absorción de agua del Onyx y Nylon y su efecto en sus propiedades mecánicas.

7.4 Desarrollos futuros en el estudio del Efecto Escala

En futuros trabajos sería conveniente repetir los ensayos con una máquina de tracción adecuada para las probetas más pequeñas y realizar el pegado de todos los tacos mediante el método de las planchas de acero y los sargentos.

También sería conveniente realizar una serie de ensayos para determinar el efecto que tienen el aumento de distintas dimensiones en las probetas. En distintos ensayos se ha visto una clara diferencia entre el aumento de diferentes dimensiones en las probetas de materiales compuestos, tendiendo a crecer la resistencia a medida que aumenta el ancho de la probeta y a disminuir a medida que crece su espesor [17].

Esta serie de ensayos podría seguir la estructura de la Figura 7-1.

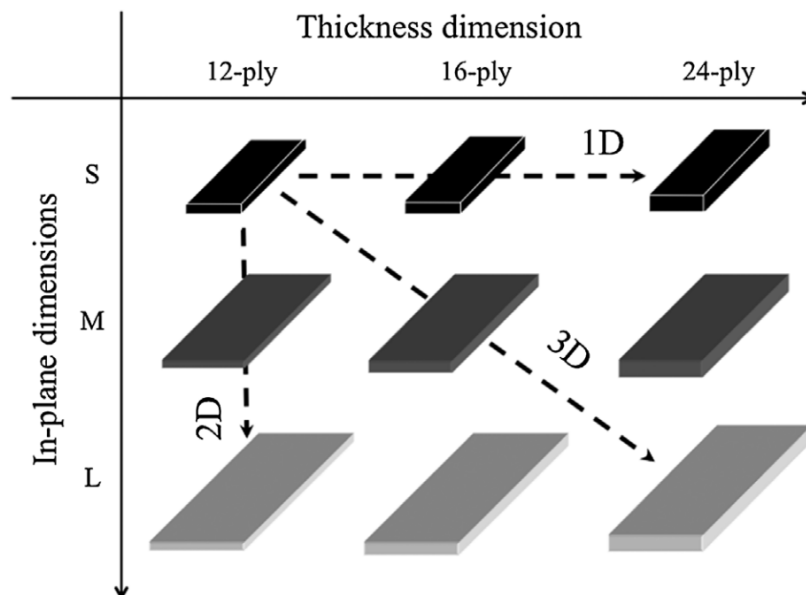


Figura 7-1. Ejemplo de una posible serie de ensayos futuros [17]

REFERENCIAS

- [1] H. Kodama, "A Scheme for Three-Dimensional Display by Automatic Fabrication of Three-Dimensional Model," *IEICE Trans. Electron.*, 1981.
- [2] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. February, pp. 172–196, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [3] K. V. Wong and A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [4] Orain Gipuzkoa, "Fabricación Aditiva: Oportunidades y claves para su incorporación en la empresa," *Orain Ekonomia*. p. 12, 2017, [Online]. Available: <https://www.gipuzkoa.eus/documents/20933/1883176/DFG-Industria4-0-Caso-Fabricacion-Aditiva-IMH-Esp.pdf>.
- [5] A. Paolini, S. Kollmannsberger, and E. Rank, "Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods," *Addit. Manuf.*, vol. 30, no. October, p. 100894, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100894.
- [6] Filament2print, "Qué puede aportar la impresión 3D en la fabricación de moldes," 2020. https://filament2print.com/es/blog/87_fabricacion-moldes-impresion-3d.html.
- [7] GoodFellow, "Precio polvo 45 micrómetros 316L," 2021. http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4J.php?ewd_token=u0X1TZo0oZ58QPr2nSPeEQnW1V4S5T&n=5Fup2wzHB0bx6UfF2HPiEp2nsRalpB.
- [8] Virtual Foundry, "Filamento 316L," 2021. <https://shop.thevirtualfoundry.com/products/stainless-steel-316l?variant=12352929431635>.
- [9] "Precio barra 316L," 2021. <https://www.randrade.com/barra-inoxidable/356-barra-inoxidable-aisi-316l-redondo.html>.
- [10] C. Yang, X. Tian, T. Liu, Y. Cao, and D. Li, "3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: Mechanism and performance," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 1, pp. 209–215, 2017, doi: 10.1108/RPJ-08-2015-0098.
- [11] General Electric, "EBM: High productivity in a powerful beam," 2021. <https://www.ge.com/additive/ebm>.
- [12] Siemens, "Additive Manufacturing: Siemens uses innovative technology to produce gas turbines," 2018. <https://press.siemens.com/global/en/feature/additive-manufacturing-siemens-uses-innovative-technology-produce-gas-turbines>.
- [13] C. and Driver, "Porsche's 3D-Printed Pistons Could Add 30 HP to the 911 GT2 RS," 2021, [Online]. Available: <https://www.caranddriver.com/news/a33289636/porsches-3d-printed-pistons-911-gt2-rs/>.
- [14] P. Parandoush and D. Lin, "A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites," *Compos. Struct.*, vol. 182, pp. 36–53, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.08.088.
- [15] Markforged, "Material Specifications: Composites," p. 1, 2019.
- [16] Z. P. Baz ĩant, "Size effect on structural strength: a review," *Arch. Appl. Mech.*, vol. 69, 1999.
- [17] M. R. Wisnom, "Size effects in the testing of fibre-composite materials," *Dep. Aerosp. Eng. Univ. Bristol, Univ. Walk, Bristol BS8 1TR, UK*, p. 21, 1999.
- [18] M. Kawai, K. Watanabe, H. Hoshi, E. Hara, and Y. Iwahori, "Effect of specimen size on longitudinal strength of unidirectional carbon/epoxy composite laminates (part 1, unnotched strength)," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 28, pp. 53–71, 2019, doi: 10.1080/09243046.2018.1458269.
- [19] G. Czél, M. Jalalvand, and M. R. Wisnom, "Hybrid specimens eliminating stress concentrations in

- tensile and compressive testing of unidirectional composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 91, pp. 436–447, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.07.021.
- [20] M. R. Wisnom and J. W. Atkinson, “Reduction in tensile and flexural strength of unidirectional glass fibre-epoxy with increasing specimen size,” *Compos. Struct.*, vol. 38, no. 1–4, pp. 405–411, 1997, doi: 10.1016/S0263-8223(97)00075-5.
- [21] A. Towse, K. Potter, M. R. Wisnom, and R. D. Adams, “Specimen size effects in the tensile failure strain of an epoxy adhesive,” *J. Mater. Sci.*, vol. 33, no. 17, pp. 4307–4314, 1998, doi: 10.1023/A:1004487505391.
- [22] A. A. Griffith, “The phenomena of rupture and flow in solids,” 1920.
- [23] R. . B. Pipes and N. J. Pagano, “Interlaminar Stresses in Composite Laminates - An Approximate Elasticity Solution,” *J. Appl. Mech.*, vol. 41, no. 3, pp. 668–672, 1974.
- [24] Markforged, “Desktop Printer User Guide,” 2019.
- [25] M. J. Mesa Quesada, “Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica Puesta a punto de un sistema de fabricación aditiva para materiales compuestos,” 2015.
- [26] C. B. Díez, “Trabajo de Máster de Fin Máster en Ingeniería Aeronáutica de Publicación Fabricación y caracterización de Superior de Ingeniería piezas de material compuesto realizadas en impresora 3D,” 2016.
- [27] Markforged, “Eiger,” 2021. <https://www.eiger.io/>.
- [28] Markforged, “Desing Guide: 3D Printing with Composites.” 2019.
- [29] “Tienda Sicnova 3D,” 2021. <https://tienda.sicnova3d.com/>.
- [30] MarkForged, “Coste Impresora Mark Two,” 2021. <https://www.mark3d.com/en/product/markforged-3d-printers/desktop-series-markforged-3d-printers/markforged-mark-two-onyx-3d-printer/>.
- [31] ASTM, “Astm D3039/D3039M,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–13, 2014, doi: 10.1520/D3039.
- [32] “Effect of Specimen Size on the Tensile Strength of Geometrically Dr . Karen E . Jackson * M . S . 495 NASA Langley Research Center Dr . Sotiris Kellas Lockheed Engineering and Sciences Company Hampton , VA 23666-1339 Abstract An experimental program was c,” pp. 167–183.
- [33] F. París, C. José, J. C. Marín, and A. Barroso, *Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Comuestos*. Selección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, 2008.
- [34] M. R. Wisnom, “Size e€fects in the testing of fibre-composite materials,” *Dep. Aerosp. Eng. Univ. Bristol, Univ. Walk, Bristol BS8 1TR, UK*, p. 21, 1999.